

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh parního generátoru pro jadernou elektrárnu generace III

Proposal of Steam Generator for Nuclear Power Plant

Generation III

Student :

Bc. Kamil Teuer

Vedoucí diplomové práce :

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Kamil Teuer**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh parního generátoru pro jadernou elektrárnu generace III.**
Proposal of Steam Generator for Nuclear Power Plant Generation III.

Zásady pro vypracování:

Navrhněte projekt vodorovného parního generátoru pro jadernou elektrárnu VVER 640 generace III + s životností 60 let. Proved'te základní tepelný, hydraulický a pevnostní výpočet a proved'te návrh separace páry.

Zadané parametry:

Elektrický výkon 645 MWe;
účinnost jaderné elektrárny čistá 33,4 %;
jmenovitý tlak v kompenzátoru objemu 15,7 MPa;
vstupní / výstupní teplota I. chladiva 293 / 333 °C;
tlak syté páry 7,05 MPa.

Seznam doporučené odborné literatury:

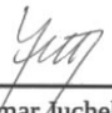
HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.
MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

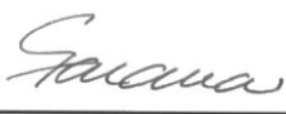
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě18.5.2012.....

..........

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc za odborné rady a cenné připomínky, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce.

Poděkování patří také mým rodičům za obětavost a podporu během studia.

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18. 5. 2012

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Kamil Teuer

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Na Lánech 44, Bolatice, 747 23

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

TEUER, K.: Návrh parního generátoru (PG) pro jadernou elektrárnu generace III. Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, katedra energetiky, 2012, 117 s. Diplomová práce, vedoucí: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Diplomová práce řeší konstrukci vodorovného PG pro jadernou elektrárnu VVER 640. Úvodní část je zaměřena na problematiku celosvětového zvyšování spotřeby elektrické energie a na výhody použití jaderné energie. Diplomová práce se zabývá podrobnějším rozbohem doposud nejvyspělejších generací jaderných elektráren a popisem PG. Výsledek diplomové práce tvoří tepelný výpočet PG ve čtyřsmyčkovém uspořádání na základě zadaných energetických parametrů, pevnostní výpočet základních rozměrů PG, hydraulický výpočet I. okruhu PG a návrh žaluziového separátoru páry.

Klíčová slova: parní generátor = tepelný výměník, generace, jaderná elektrárna, tlakovodní reaktor, bezpečnost

ANOTATION OF THESIS

TEUER, K.: Proposal of Steam Generator for Nuclear Power Plant Generation III. Master thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2012, 117 p. Thesis head: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

The thesis is focused on the construction of horizontal steam generator for nuclear power plant VVER 640. The introductory part is aimed on the global energy consumption increase and the benefits of nuclear energy use. The diploma thesis also minutely describes the most advanced generation of nuclear power plants and a description of a steam generator. The result of the thesis is the thermal calculation of the steam generator in a four-loop layout calculated on the basis of provided energetic parameters, stress analysis of the basic parameters of the steam generator, hydraulic analysis of the steam generator's first circle and a design of the louver-type steam separator.

Keywords: steam generator = heat exchanger, generation, nuclear power plant, Pressurized water reactor, safety

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	9
1. Úvod	14
2. Historie jaderné energetiky.....	15
2.1 Začátky během války	15
2.2 Rozvoj jaderné energetiky.....	15
2.3 Následky havárií.....	16
3. Současnost jaderných elektráren	18
3.1 Aktuálně ve světě	18
3.2 Stav v České Republice.....	19
3.3 Budoucí generace	20
4. Rozdělení generací	21
5. III+ Generace jaderných elektráren	23
5.1 Historie	23
5.2 Princip	24
5.3 Bezpečnost	24
5.4 Tlakovodní reaktory	24
5.4.1 Rozdělení	24
5.4.2 Blok VVER 640.....	26
5.4.3 Evropský tlakovodní reaktor EPR III+	27
5.4.4 Americký tlakovodní reaktor AP-600 III+, 1000 III+	29
6. IV. Generace jaderných elektráren	31
6.1 Historie projektu GIF	31
6.2 Požadavky na jaderné elektrárny IV. generace	31
6.3 Výběr možných reaktorových systémů	34
7. Primární okruh jaderné elektrárny	36
8. Popis parního generátoru	39
9. Tepelný výpočet parního generátoru	42
9.1 Počet trubek a celková průtočná plocha primárního média	43
9.2 Součinitel přestupu tepla mezi vnitřní stěnou trubky a primárním médiem	45

9.3	Součinitel přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a sekundárním médiem	47
9.4	Střední logaritmická teplota	47
9.5	Součinitel prostupu tepla.....	48
9.6	Velikost teplosměnné plochy a střední délky trubky	51
9.7	Tepelný a parní výkon PG.....	51
10.	Tepelné zatížení teplosměnné plochy po délce trubky	53
11.	Materiály PG	63
12.	Návrh a pevnostní výpočet základních rozměrů PG	66
12.1	Plášť PG	66
12.1.1	Nominální tloušťka stěny středního kroužku parního generátoru	68
12.1.2	Nominální tloušťka stěny bočního kroužku parního generátoru	74
12.1.3	Nominální tloušťka stěny eliptického dna parního generátoru.....	76
12.1.4	Nominální tloušťka stěny nátrubku průlezu parního generátoru	79
12.1.5	Nominální tloušťka deskového víka průlezu parního generátoru:.....	80
12.1.6	Nominální tloušťka stěny nátrubku průlezu II. Okruhu.....	80
12.1.7	Nominální tloušťka stěny eliptického víka průlezu II. okruhu	81
12.1.8	Nominální tloušťka stěny nátrubku napájecí vody	82
12.1.9	Nominální tloušťka stěny nátrubku o průměru 1105 mm.....	82
12.1.10	Nominální tloušťka stěny nátrubku přívodu havarijní vody:	83
12.1.11	Nominální tloušťka stěny nátrubku páry.....	84
12.2	Kolektor páry	84
12.2.1	Nominální tloušťka stěny válcové části kolektoru páry	85
12.2.2	Nominální tloušťka stěny kulového dna kolektoru páry.....	87
12.2.3	Nominální tloušťka stěny nátrubku kolektoru páry	88
12.3	Kolektor I.okruhu	89
12.3.1	Nominální tloušťka stěny deskového víka průlezu I. Okruhu	89
12.3.2	Nominální tloušťka stěny horní válcové části kolektoru	90
12.3.3	Nominální tloušťka kuželové části kolektoru	91
12.3.4	Nominální tloušťka stěny děrované válcové části kolektoru.....	92

12.3.5	Nominální tloušťka stěny kolektoru v místě svaru přechodového prstence ..	93
12.3.6	Nominální tloušťka stěny teplosměnné trubky kolektoru.....	94
12.3.7	Nominální tloušťka stěny válcové části přechodového prstence kolektoru...	95
12.4	Tabulka základních rozměrů PG	96
13.	Hydraulický výpočet I. okruhu PG.....	97
13.1	Stanovení jednotlivých hydraulických ztrát.....	97
13.1.1	Tlaková ztráta v příváděcím potrubí.....	97
13.1.2	Tlaková ztráta ve vstupním kolektoru	98
13.1.3	Tlaková ztráta na vstupu do střední řady teplosměnných trubek.....	99
13.1.4	Tlaková ztráta při proudění v teplosměnných trubkách.....	100
13.1.5	Tlaková ztráta změnou směru proudu o 180°	100
13.1.6	Tlaková ztráta na výstupu z teplosměnných trubek.....	101
13.1.7	Tlaková ztráta ve výstupním kolektoru	102
13.1.8	Tlaková ztráta v odváděcím potrubí	102
13.2	Celková tlaková ztráta primárního okruhu PG.....	103
14.	Návrh separace páry	104
14.1	Žaluziový separátor.....	105
14.2	Výpočet žaluziové separace	106
14.3	Hydraulický výpočet žaluziového separátoru:	108
15.	Závěr a shrnutí dosažených výsledků.....	109
16.	Seznam použité literatury	111
17.	Seznam příloh.....	113

Seznam použitých značek a symbolů

Označení	Jednotka	Popis
A	[1]	Výpočtová konstanta
C	[1]	Parametr charakterizující maximální zatížení
D	[mm]	Nominální vnitřní průměr válcové části tlakové nádoby, dna, víka a potrubí
D _s	[mm]	Střední průměr pláště
D _v	[mm]	Nominální vnější průměr válcové části tlakové nádoby, dna, víka a potrubí
G	[kg·s ⁻¹]	Parní výkon
K	[1]	Koeficient tvaru víka
K ₀	[1]	Koeficient oslabení vlivem otvorů
K _u	[1]	Kutateladzeho kritérium
L	[mm]	Vzdálenost okrajů otvorů
L _{tr}	[m]	Délka střední trubky
L _{trC}	[m]	Celková délka trubek
M	[1]	Pomocný parametr
Nu _{I,St}	[1]	Nusseltovo kritérium I. média při střední teplotě
Pr _{I,St}	[1]	Prandlovo kritérium při střední teplotě I.média
Pr _{tr,St}	[1]	Prandlovo kritérium při střední teplotě stěny trubky
Q _{PG}	[kW]	Tepelný výkon parního generátoru
Q _{PG,sk}	[kW]	Tepelný výkon parního generátoru (zadán)
R _c	[m ² ·K·W ⁻¹]	Celkový tepelný odpor
R _e	[MPa]	Mez kluzu
R _m	[MPa]	Mez pevnosti
Re _{I,St}	[1]	Reynoldovo číslo I. média při střední teplotě
S	[m ²]	Teplosměnná plocha
S _h	[m ²]	Plocha hladiny
S _{I,C}	[m ²]	Celková průtočná plocha I. média
S _{I,C(t)}	[m ²]	Celková průtočná plocha I. média (teoretická)
S _{sep}	[m ²]	Průtočná plocha separátoru
S _{sep(dop)}	[m ²]	Průtočná plocha separátoru (doporučená)
S _{tr}	[m ²]	Průtočná plocha jedné teplosměnné trubky

X_1	[1]	Ztrátový součinitel při proudění ve vstupním kolektoru
X_2	[1]	Ztrátový součinitel při proudění ve výstupním kolektoru
a	[mm]	Vzdálenost mezi příčnými řadami
b	[mm]	Vzdálenost mezi podélnými řadami
b_z	[mm]	Rozvinutá šířka žaluzie
c	[mm]	Přídavek k tloušťce stěny
c_1	[mm]	Záporná tolerance tloušťky stěny
c_2	[mm]	Zeslabení stěny vlivem všech druhů koroze v závislosti na rychlosti koroze a době provozu nádoby
d	[mm]	Vnitřní průměr otvorů nátrubku
d_1	[mm]	Vnitřní průměr teplosměnné trubky
d_2	[mm]	Vnější průměr teplosměnné trubky
d_{k1}	[m]	Vnitřní průměr přiváděcího kolektoru
d_{k2}	[m]	Vnitřní průměr odváděcího kolektoru
d_{op}	[m]	Vnitřní průměr odváděcího potrubí
d_{pp}	[m]	Vnitřní průměr přiváděcího potrubí
d_{vn}	[mm]	Vnější průměr nátrubku
f_h	[mm ²]	Plocha vyztužujícího průřezu nátrubku
g	[m·s ⁻²]	Tíhové zrychlení
h	[mm]	Výška vypouklé části víka a dna
h_h	[m]	Výška vyztužující části nátrubku
h_{max}	[mm]	Maximální výška vyztužujícího nátrubku
h_p	[m]	Průměrná výška parního prostoru
h_z	[m]	Výška žaluzie
i'	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie syté vody
i''	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie syté páry
$i_{I,1}$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie I. média na vstupu
$i_{I,2}$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie I. média na výstupu
i_{NV}	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie napájecí vody při teplotě $t = 220^\circ\text{C}$
k	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel prostupu tepla
k_k	[1]	Koeficient bezpečnosti
l_{k1}	[m]	Výpočtová délka přiváděcího kolektoru
l_{k2}	[m]	Výpočtová délka odváděcího kolektoru

l_v	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	Výparné teplo vody
l_{sep}	$[\text{m}]$	Délka separátoru
l_v	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	Výparné teplo vody
m	$[1]$	Pomocná výpočtová konstanta
m_I	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Průtok I. média
n_{tr}	$[1]$	Celkový počet trubek
$n_{\text{tr}(t)}$	$[1]$	Celkový počet trubek (teoretický)
p	$[\text{MPa}]$	Výpočtový tlak
p_I	$[\text{MPa}]$	Tlak v I. okruhu
p_{II}	$[\text{MPa}]$	Tlak syté páry
p_{z1}	$[\text{Pa}]$	Tlaková ztráta na vstupu do příváděcího kolektoru
p_{z2}	$[\text{Pa}]$	Tlaková ztráta v příváděcím kolektoru
p_{z3}	$[\text{Pa}]$	Tlaková ztráta na vstupu do teplosměnných trubek
p_{z4}	$[\text{Pa}]$	Tlaková ztráta prouděním v teplosměnných trubkách
p_{z5}	$[\text{Pa}]$	Tlaková ztráta změnou směru proudění
p_{z6}	$[\text{Pa}]$	Tlaková ztráta na výstupu z teplosměnných trubek
p_{z7}	$[\text{Pa}]$	Tlaková ztráta v odváděcím kolektoru
p_{z8}	$[\text{Pa}]$	Tlaková ztráta na výstupu z odváděcího kolektoru
p_{zC}	$[\text{Pa}]$	Celková tlaková ztráta v I. okruhu parního generátoru
$p_{z\text{sep}}$	$[\text{Pa}]$	Tlaková ztráta separátoru
$q_{I\text{St}}$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1}]$	Střední tepelný tok stěnou trubky (na metr)
q_{St}	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	Střední tepelný tok stěnou trubky
$q_{\text{St}(t)}$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$	Střední tepelný tok stěnou trubky (teoretický)
s	$[\text{mm}]$	Minimální nominální tloušťka stěny
s_1	$[\text{mm}]$	Tloušťka deskového víka
s_h	$[\text{mm}]$	Nominální tloušťka stěny nátrubku
s_N	$[\text{mm}]$	Navržená nominální tloušťka stěny
s_{oh}	$[\text{mm}]$	Minimální výpočtová tloušťka pro vyztužení otvoru
$t_{I,1}$	$[\text{°C}]$	Teplota I. média na vstupu
$t_{I,2}$	$[\text{°C}]$	Teplota I. média na výstupu
$t_{I,\text{St}}$	$[\text{°C}]$	Střední teplota I. média
t_{II}	$[\text{°C}]$	Teplota syté páry
t_{NV}	$[\text{°C}]$	Teplota napájecí vody
t_{trI}	$[\text{°C}]$	Povrchová teplota stěny trubky na straně I. média
t_{trII}	$[\text{°C}]$	Povrchová teplota stěny trubky na straně II. média

t_{trSt}	[°C]	Střední teplota stěny trubky
$t_{tr,St(t)}$	[°C]	Střední teplota stěny trubky (teoretická)
t_z	[m]	Rozteč žaluzií
$V_{I,St}$	[m ³ ·kg ⁻¹]	Měrný objem I. média při střední teplotě
w_h	[m·s ⁻¹]	Parní zatížení hladiny
w_I	[m·s ⁻¹]	Střední rychlost proudění I. média
$w_{I,(t)}$	[m·s ⁻¹]	Střední rychlost proudění I. média (teoretická)
$w_{I,1}$	[m·s ⁻¹]	Střední rychlost proudění I. média na vstupu do střední řady teplosměnných trubek
$w_{I,2}$	[m·s ⁻¹]	Střední rychlost proudění I. média na výstupu ze střední řady teplosměnných trubek
w_{k1}	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudění I. média v příváděcím kolektoru
w_{k2}	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudění I. média v odváděcím kolektoru
w_{kr}	[m·s ⁻¹]	Kritická rychlost
w_{op}	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudění I. média v odváděcím potrubí
w_{pp}	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudění I. média v příváděcím potrubí
w_{sep}	[m·s ⁻¹]	Vstupní rychlost páry do separátoru
$w_{sep(dop)}$	[m·s ⁻¹]	Vstupní rychlost páry do separátoru (doporučená)
x	[1]	Suchost
$(1-x)$	[1]	Vlhkost páry
$\Delta Q_{PG,rel}$	[%]	Odklon skutečného tepelného výkonu parního generátoru od zadaného
Δq_{rel}	[%]	Relativní chyba volené hodnoty středního tepelného toku
Δt_1	[°C]	Teplotní rozdíl mezi vstupujícím I. médiem a II. médiem
Δt_2	[°C]	Teplotní rozdíl mezi vystupujícím I. médiem a II. médiem
Δt_{ln}	[°C]	Střední logaritmický teplotní spád
Δt_{trRel}	[%]	Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky
α	[°]	Úhel sklonu stěny kuželové části kolektoru
α_I	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla na straně I. média
α_{II}	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla na straně II. média
α_{zt}	[°]	Polovina úhlu zakřivení toku páry

ζ_{k1}	[1]	Ztrátový součinitel na vstupu do příváděcího kolektoru
ζ_{k2}	[1]	Ztrátový součinitel na výstupu do odváděcího kolektoru
ζ_{tr1}	[1]	Ztrátový součinitel na výstupu do střední řady teplosměnných trubek
ζ_{tr2}	[1]	Ztrátový součinitel na výstupu ze střední řady teplosměnných trubek
ζ_{zsp}	[1]	Ztrátový součinitel změnou směru proudění
$\zeta_{\check{z}}$	[1]	Koeficient odporu žaluzie
$\eta_{l,St}$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	Dynamická viskozita I. média při střední teplotě
η_{PG}	[%]	Účinnost parního generátoru
$\lambda_{l,St}$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti I. média při střední teplotě
λ	[1]	Součinitel tření
λ_{tr}	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti teplosměnné trubky
$\rho_{l,1}$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota I. média při vstupní teplotě
$\rho_{l,2}$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota I. média při výstupní teplotě
$\rho_{l,St}$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota I. média při střední teplotě
ρ_{mp}	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota vstupující mokré páry
ρ'	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota syté vody
ρ''	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota syté páry
σ	[MPa]	Povrchové napětí vody
σ_D	[MPa]	Nominální dovolené napětí
$\nu_{l,St}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Kinematická viskozita I. média při střední teplotě
φ	[1]	Koeficient pevnosti elementu oslabeného otvory nebo svarovým švem
φ_0	[1]	Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti elementu oslabeného otvory nebo svarovým švem

1. Úvod

Během příštích 25 let se zdvojnásobí globální potřeba zdrojů elektřiny podle Světové rady pro energii WEC (World Energy Council) a emise CO_2 stoupnou až o 100%. Ačkoliv je nezbytné se usilovně snažit o zvýšení účinnosti výroby energie, dosažení pokroku v jejich úsporách a rozvoji obnovitelných zdrojů, není jisté, zda toto úsilí zredukuje budoucí dlouhodobou poptávku energie v průmyslovém měřítku.

Možnost států, které chtějí být na surovinách ze zahraničí nezávislé a nejsou schopny pokrýt svou spotřebu alternativními zdroji, mohou v současnosti k výrobě elektřiny využívat pouze uran a uhlí. Při zvážení obrovského množství CO_2 do ovzduší vypuštěné elektrárnami na fosilní paliva, je jaderná energetika nejohleduplnější zdroj energie v současnosti.

Za posledních 20 let je celkový objem emisí oxidu uhličitého, ušetřený jadernou energetikou kolem 9 % celkového množství všech plynů emitovaných pro účely výroby energie obsahující uhlík. Při omezení jen na produkci elektřiny je toto číslo 28 %. Z globálního pohledu se neustále diskutuje o snižování emisí. S ohledem na přírodní zdroje pro výrobu energie za použití jaderných procesů jsou poměrně velké. Pokud bude možnost využít jadernou fúzi a uzavřený palivový cyklus, mohly by se stát prakticky neomezenými zdroji energie.

V mnoha zemích se objevují námitky proti jaderné energii vzhledem k její spojitosti s jadernými zbraněmi a obavám o bezpečnost jaderných reaktorů. Tyto aspekty se berou v úvahu a navíc existuje problém dlouhodobého ukládání radioaktivních odpadů. Avšak na problém se musí nahlížet objektivně a ze správné perspektivy. Všechny zdroje energie v sobě nesou jistá rizika, ať už se jedná o dobývání, přepravu paliv nebo formu škodlivých emisí. I když se oponenti jaderné energetiky budou snažit navrhnout realizovatelné a bezpečnější zdroje energie, které uspokojí budoucí poptávku, jaderná energie zvítězí, až její příznivci prokážou, že její přednosti vítězí nad negativy. Podpora programů úspor energií a životaschopné alternativní energetické zdroje ze strany vlád všech zemí a nátlak na ně, bude společným cílem obou stran.

2. Historie jaderné energetiky

2.1 Začátky během války

Poprvé se řetězovou reakci podařilo vyvolat v Chicagu roku 1942 a to týmu vědců vedených italským profesorem Enricem Fermim. Tato práce vedla později k vývoji atomové bomby v projektu Manhattan. Co se tehdy vědcům povedlo, se obvykle označuje jako „rozbití atomu“. Vědci našli způsob rozbití atomového jádra složeného z protonů a neutronů. Tímto procesem dochází ke ztrátě určitého množství hmoty a současně k uvolnění obrovského množství energie.

O zásadní vývoj jaderné energetiky se zasloužil především vojenský výzkum v průběhu druhé světové války a masivní zbrojení za doby studené války. Roku 1943 se u města Albuquerque začali shromažďovat vojáci a nejlepší vědci Spojených států Amerických i Evropy, kteří utekli před Hitlerem. Tam za nejprísnějšího utajení vyvíjeli atomovou bombu a s její pomocí chtěli předčasně ukončit světové války. Po zkoušce 16. července 1945, shodili Američané první atomovou bombu na město Hirošima, ležící na západě největšího japonského ostrova Honšú, dne 6. srpna 1945.

Sovětský svaz měl také svůj program na výzkum atomové zbraně, ale oproti Americe značně zaostával. Nebýt špiónů v tajných laboratořích v USA a příznivců tehdejšího sovětského svazu v Los Alamos, nedohnali by v průběhu války Ameriku při nejdůležitějším výzkumu doby.

2.2 Rozvoj jaderné energetiky

Po skončení válek se vývoj atomových reaktorů vydal svou vlastní cestou a netýkal se jen výroby elektřiny, ale i pohonu lodí, letadel, ponorek a dokonce se uvažovalo i o pohonu kosmických lodí, od kterého se nakonec pro jeho extrémní složitost upustilo. Nicméně v roce 1954 byla sestrojena první americká ponorka Nautilus, přičemž právě Rusko nyní vlastní největší podmořské loďstvo s jaderným pohonem na světě.

Důležitým článkem ve vývoji jaderných reaktorů se stala možnost přeměny uranu na plutonium. Díky svému krátkému poločasu rozpadu se plutonium v přírodě skoro nevyskytuje, přičemž je nejefektivnější náplní pro atomové bomby. Proto ho USA i Sovětský svaz během války vyrobily obrovské množství. V dnešní době se pro něj hledá mírové uplatnění.

První využití jaderné energie pro výrobu elektrické energie se experimentálně uskutečnilo 20. prosince 1951 v Národní reaktorové laboratoři ARCO (USA – stát Idaho). První pokusná jaderná elektrárna byla spuštěna 25. června 1954 v Obnisku jihozápadně od Moskvy.

Rozvoj jaderné energie začal bezesporu 8. prosince 1953 konferencí, výstavou a slavným projevem tehdejšího amerického prezidenta Dwight D. Eisenhowera „Atomy pro mír“ v Ženevě, ve kterém navrhoval vznik Mezinárodní agentury pro atomovou energii MAAE (založena 29. července 1957). Zde také především jaderné velmoci informovaly světovou veřejnost o prvních dodávkách elektřiny z jaderných elektráren do veřejné sítě, budoucích výhledech staveb a spouštění dalších jaderných elektráren.

O výstavbě první „komerční“ jaderné elektrárny Shippingport ve státě Pennsylvania bylo rozhodnuto krátce po konferenci. Firma Westinghouse dostala přednost jako dodavatel reaktoru, jež čerpala zkušenosti svých inženýrů a vědců, kteří je nasbírali v tehdejších vojenských projektech. Avšak MAAE označuje jako první skutečně komerční jednotku až elektrárnu Dresden-1 s výkonem 207 MWe spuštěnou v roce 1960. Do provozu v bývalém Československu byla uvedena jaderná elektrárna A-1, typu KS-150 s výkonem 150 MWe, dne 25. prosince 1972 v Jaslovských Bohunicích u Trnavy.

2.3 Následky havárií

První narušení příznivého obrazu jaderné energetiky se datuje 28. března 1979. Došlo k havárii druhého bloku elektrárny Three Mile Island blízko amerického města Harrisburg ve státě Pennsylvania, kdy se částečně roztavil druhý jaderný reaktor elektrárny. Byla zamořena její provozní budova a došlo k rozsáhlému úniku radioaktivity do životního prostředí. I když byl únik radiace velmi malý a škody na životním prostředí oproti pozdější havárii v Černobyli zanedbatelné, tehdejší energetika utrpěla značné škody na své pověsti, důvěry občanů i politiků už tehdy.

Avšak nejtragičtějším dnem a katastrofu pro jadernou energetiku se bezpochyby stalo datum 26. dubna 1986, kdy došlo k výbuchu čtvrtého reaktoru černobylské elektrárny (známé jako Černobyl-4), jihovýchodně nedaleko od města Pripjat', který odtrhl víko reaktoru o váze 1200 tun, vyústil v požár, proběhla řada dalších explozí a roztavení jádra reaktoru. Okolo 130 000 lidí z blízkého okolí muselo být evakuováno. Havárie zasáhla značné území obrovským množstvím radioaktivních látek. Pro jadernou energetiku měla

tato událost fatální následky a prakticky to znamenalo zastavení dalšího rozvoje, který se pozvolna začal obnovovat teprve ke konci století.

3. Současnost jaderných elektráren

3.1 Aktuálně ve světě

Současná doba přináší nový dech v rozvoji jaderné energetiky. Nyní a ani v budoucnu, nebude možné jadernou energii nahradit (pokud nebereme v potaz palivový cyklus uhelných elektráren jako alternativu) a to si mnoho zemí pozvolna začíná uvědomovat.

Za změnou stojí problémy s alternativními zdroji, růst cen zemního plynu a ropy či zvyšování energetických potřeb v rozvojových zemích.

V roce 2008 vyrobily jaderné elektrárny kolem 15 % světové elektřiny, přičemž v EU to bylo přibližně 35 % z celkové vyrobené elektřiny. Celkem 15 zemí se opírá o dodávku jaderné energie, alespoň čtvrtinou celkově vyrobené elektřiny. Země vytvářející největší část podílu na elektřinu v roce 2008 z jaderné energetiky byly uvedeny v tabulce 3.1.

Země	%	Země	%
Francie	76.2	Slovinsko	41.7
Litva	72.9	Arménie	39.4
Slovensko	56.4	Švýcarsko	39.2
Belgie	53.8	Maďarsko	37.2
Ukrajina	47.4	S. Korea	35.6
Švédsko	42.0	Bulharsko	32.9

Tab. 3.1: Země dodávající si procentuálně elektřinu z jaderných elektráren

V dubnu 2010 bylo ve 29 zemích po celém světě v provozu 438 jaderných reaktorů pro výrobu elektřiny – především v Evropě, Kanadě, Severní Americe a 57 nových jaderných elektráren, jejichž výstavba začala ve 14 zemích.

Přesto se v současnosti na poli jaderné energetiky nejvíc podílí Evropa (15 zemí), Asie (8 zemí), Severní Amerika (3 země) a Jižní Amerika (2 země).

Tabulka 3.2 ukazuje počet, typ a výkon elektráren v provozu i ve výstavbě k tomuto datu, kde Spojené státy nejsou rozděleny na příslušné druhy reaktoru, ale pouze počet elektráren v provozu a jedna ve stavebním procesu.

	V provozu		Ve výstavbě	
Typ	Počet jednotek	Celkem MWe	Počet jednotek	Celkem MWe
ABWR	4	4950	3	3925
AGR	14	7535	0	0
BWR	53	44795	0	0
FBR	1	560	2	1274
GCR	4	1414	0	0
LWGR	15	10219	1	915
PHWR	46	22840	2	894
PWR	147	143082	48	46039
VVER	50	35608	0	0
U.S.A.	104	100683	1	1165
Celkem	438	371686	57	54212

Tab. 3.2: Využívání a výstavba reaktorových systémů ve světě a U.S.A

Do budoucna se odhaduje, že počet jaderných zařízení bude ve světě nadále stoupat. Nejvíce hlavně v Číně, Rusku, USA, Jižní Africe a Indii. Podle prognózy z roku 2006 podle japonského institutu Institute of Energy Economics se má instalovaný výkon jaderné energie do roku 2030 zvýšit o 30 % ze současných 372 GW na 499 GW.

3.2 Stav v České Republice

Na území bývalé Československé Republiky byl zahájen provoz první jaderné elektrárny Dukovany v srpnu 1985. Dnes jsou v provozu čtyři bloky s tlakovodními reaktory typu VVER-440 – model V 213, každý o elektrickém výkonu 440 MWe. V totéž roce se zahájila výstavba druhé jaderné elektrárny Temelín, jihozápadně od města Týn nad Vltavou na jihu Čech a do provozu byla uvedena v letech 2002 až 2003. Temelín vyrábí elektřinu ve dvou blocích s tlakovodními reaktory VVER 1000 typu V 320

s celkovým instalovaným výkonem 2x1000 MWe. Na výrobě elektrické energie v České republice se tyto dvě jaderné elektrárny podílejí 35 %.

V České republice jsou kapacity pro výrobu energie prozatím dostačující, ale po čase, kdy budou uhelné elektrárny dosluhovat a především z prognózy zvyšující se spotřeby elektřiny nejen v ČR, ale i ve světě a v EU, lze očekávat deficit elektrické energie a s tím souvisí podpora získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů, renovací uhelných elektráren a hlavně z výstavby nových jaderných bloků.

3.3 Budoucí generace

O III+ a IV generaci jaderných reaktorů se hovoří v souvislosti s plánováním nových projektů, které vycházejí ze zdokonalování doposud fungujících typů, znalostí konstrukčních prvků a využívání nových technologických možností.

Jaderné reaktory III+ generace se vyznačují zvýšenou spolehlivostí, bezpečností, delší životností, zjednodušenou konstrukcí, nižšími investičními náklady, menším množstvím radioaktivního odpadu a celkovou vyšší efektivností provozu. Do této generace například spadá projekt EPR – evropský tlakovodní reaktor a japonský SWR-1000. Dále k této skupině řadíme následovníky typu VVER (vodovodný energetický reaktor), projekty VVER 1000 nebo VVER 640, ke kterému se mimo jiné vztahuje tato diplomová práce.

Plán na využití jaderných reaktorů IV generace je rozvržen až do roku 2030, kdy bude mnoho v současnosti provozovaných reaktorů dosluhovat. Řídí se doporučeními Mezinárodní skupiny pro jadernou bezpečnost (INSAG). Se zvyšující spotřebou energie ve světě, předpokládají projekty i vyšší podíl jaderných systémů tyto potřeby kryjící.

S předpokládaným nárůstem spotřeby energie ve světě, budou muset tyto spotřeby být kryty ve vysokém podílu jadernými systémy.

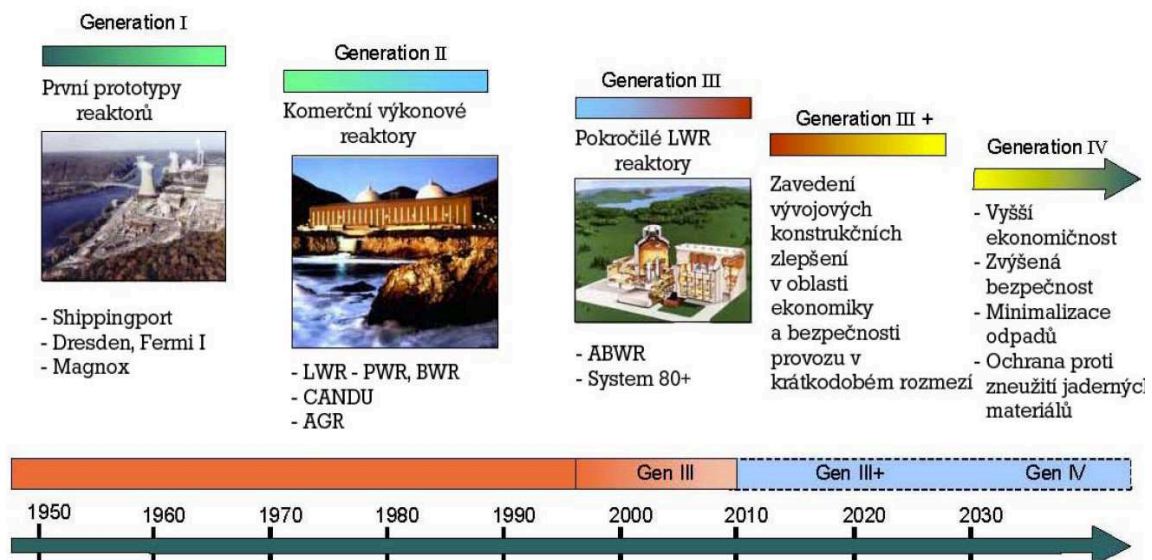
Primární cíle jsou:

- Minimalizovat množství jaderného odpadu a trvale zajišťovat udržitelný rozvoj výroby energie splňující požadavky na čistotu ovzduší.
- V porovnání s jinými zdroji energie musí být jaderné systémy IV generace cenově výhodnější a musí mít úroveň finančního rizika porovnatelnou s ostatními energetickými systémy.

4. Rozdělení generací

Přehled všech generací jaderných reaktorů vidíme na obrázku 4.1, jež jsou rozděleny do kategorií zhruba následovně:

- **Generace I:** První prototypy komerčních reaktorů z 50. a 60. let, které už v dnešní době nejsou v provozu. Zástupcem je například jaderná elektrárna Shippingport v Americkém státu Pennsylvania. Výstavba elektrárny tehdy stála 72,5 miliónů amerických dolarů.
- **Generace II:** Vychází z koncepcí ověřených na reaktorech I. generace. Jednalo se o série elektráren projektovaných a postavených jednotlivě, ale s reaktory patřícími ke stejnému typu a pozdější projekty úzce navazovaly na ty předchozí. Nyní tvoří páteř jaderné energetiky reaktory postavené v 70. až 80. letech, jejichž éra začala v 70. letech minulého století velkými komerčními elektrárnami.
- **Generace III:** Vzniká od 90. let minulého století se spousty zdokonalených prvků, které doposud nabízejí významný pokrok z hlediska ekonomiky a bezpečnosti, jenž jsou někdy označovány jako „pokročilé reaktory“. Dochází k daleko intenzivnějšímu využití paliva, prodlužuje se doba mezi jeho výměnami a životnost elektrárny by se měla standardně posunout na 60 let. Dochází také ke standardizaci jednotlivých typů reaktorů a předpokládá se „sériová“ výroba elektráren. Postaveny byly především ve východní Asii. V Japonsku fungují například od roku 1996. Nový tlakovodní reaktor EPR budovaný ve Finsku, také spadá do této kategorie. Licenci ve Spojených státech získal reaktor AP-600, 1000 od Westinghouse Company, ale žádná elektrárna zatím není ve výstavbě.



Obr. 4.1: Přehled generací jaderných elektráren

- Generace III+:** Tato generace prozatím prochází vývojem a schvalovacím řízením u regulátoru. S uvedením do provozu se počítá v průběhu roku 2010. Označují se zde projektované reaktory, které mají vylepšené pasivní prvky bezpečnosti tak, aby se v případě nestandardní situace dostaly do bezpečného stavu automaticky bez jakýchkoliv aktivních částí. Řadí se k nim hlavně modulární reaktory s kuličkovým keramickým palivem PBMR (výstavba v Číně), evropské SWR-1000 a EPR, který se staví ve Finsku a Francii. Americký AP1000 a IRIS od firmy Westinghouse, pokročilý varný reaktor, lehkou vodou chlazený, moderovaný reaktor ABWR a ESBWR od GE, GT-MHR. Do roku 2030 budou všechny postavené reaktory vybrány z této generace a budou tvořit základ jaderné energetiky v příštích desetiletích. Měly by nahradit dosluhující jaderné elektrárny a přispět i ke zvýšení podílu jaderné energetiky na výrobě energie ve světě. Dále se diplomová práce věnuje zmíněným reaktorům: VVER 640, EPR a AP 1000.
- Generace IV:** Prozatím nejvyspělejší jaderné reaktory obsahující mnoho aktivních i pasivních bezpečnostních prvků. Jejich plán využití je rozvržen do roku 2030, kdy bude u konce životnost dosavadních reaktorů. Hlavní důraz se klade na vyšší ekonomičnost, bezpečnost a ochranu proti zneužití jaderných materiálů. Počítá se s využitím chladících látek, umožňující mnohem vyšší teploty v provozu místo obvyklé vody a tím i zvýšení účinnosti.

5. III+ Generace jaderných elektráren

5.1 Historie

Před více než čtyřiceti lety americká firma Westinghouse vyvinula tlakovodní jaderný reaktor pro americké námořnictvo jako kompaktní zdroj energie. Jeho přednosti se ukázaly natolik významné, proto byl přizpůsoben pro využití v jaderných elektrárnách. V roce 1956 vznikl projekt tohoto reaktoru s výkonem 200 MWe. Pro první jadernou elektrárnu na principu VVER (česky – vodovodný energetický reaktor), bylo k zvážení několik míst. Privilegium obdržela elektrárna Novovoreněž, kde byly posléze vybudovány reaktory všech generací VVER.

Od roku 1961 se komerčně používají tlakovodní reaktory I. generace, kdy byla mimo jiné uvedena do provozu i jaderná elektrárna Yankee Rowe v USA s výkonem 167 MWe/600 MWt. Byly neustále vyvíjeny a v dnešních podmínkách se standardně používají tlakovodní reaktory o výkonech až 1600 MWe a vyrábějí přes 80% světové produkce jaderné energie. Prodáním licence na jejich výrobu firmy Westinghouse francouzské firmě Framatome, německé Kraftwerk Union (Siemens) a japonské Mitsubishi Heavy Industries se dosáhlo, že tlakovodní reaktory se staly nejpoužívanějším typem. Po úspěchu vyvinuly další dvě americké firmy tlakovodní reaktor a to Babcock & Wilcox Company a Combustion Engineering. USA a Sovětský svaz souběžně vyvíjely tlakovodní reaktory.

První blok reaktoru typu VVER-440/210 (prototyp) byl do sítě připojen 31. 12. 1964 v jaderné elektrárně Novovoreněž a svou životaschopnost ukončil v únoru roku 1988. Druhý blok reaktoru VVER-440/365 (prototyp), byl přifázován 27. prosince 1969 a svůj provoz ukončil dne 29. srpna 1990. Do provozu bylo uvedeno dalších deset reaktorů i mimo Sovětský svaz v rámci mezinárodních dohod. Provozem se prokázala technická spolehlivost a proveditelnost tohoto systému, avšak bylo zároveň zjištěno mnoho nedostatků v projektu a konstrukci zařízení a získané poznatky byly velice důležité pro výstavbu dalších bloků mj. i pro Českou Republiku. Zbýlé tři doposud fungující reaktory v jaderné elektrárně Novovoreněž z nichž je poslední prototyp VVER-1000, mají plánované odstavení do roku 2020. Šestý a zatím poslední blok v této elektrárně je prozatím od roku 2007 ve výstavbě.

5.2 Princip

Rychlé (vysoko-energetické) neutrony v tepelném reaktoru vygenerované štěpnou reakcí zpomalují za pomoci moderátoru na úroveň „tepelné“ energie pružnými srážkami s lehkými prvky. Nejlepším moderátorem je těžká voda. Také grafit je označován za dobrý moderátor a i v obyčejné vodě dochází k intenzivnímu zpomalování neutronů. Zpomalováním produktů štěpením vzniká teplo v reaktoru, které dojde po rozštěpení jader uranu ^{235}U . Voda protéká reaktorem a slouží jako chladivo, odvádí teplo a tím ochlazuje jeho aktivní zónu. Za použití vysokých tlaků (15,7 MPa) v primárním okruhu reaktoru se zabrání vodě přijít do bodu varu. Ohřátá voda proudí z reaktoru do PG (tepelný výměník) a zde předá svou tepelnou energii cirkulující vodě v odděleném sekundárním okruhu, jenž už není radioaktivní. Zde už jsou tlaky nižší, než v primárním okruhu, proto dochází k přeměně vody na vodní páru. Pára proudící ze separátoru páry, obsaženého v PG, je přiváděna do turbíny, kterou následně roztáčí působením na její lopatky. Po předání energie páry turbíně je pára odváděna do kondenzátoru, kde následně kondenzuje. Třetí chladicí okruh elektrárny zajišťuje chlazení kondenzátorů.

5.3 Bezpečnost

Mezi přednosti tlakovodních reaktorů patří jejich jednoduchost a inherentní bezpečnost. Fyzikální principy použité při konstrukci, významně přispívají k bezpečnému provozu reaktoru. Voda protékající reaktorem umožňuje jadernou reakci a zároveň ochlazuje reaktor. Voda totiž zpomaluje uvolněné rychlé neutrony na úroveň tepelné energie. Tím se zvyšuje pravděpodobnost štěpení při srážkách s jádrem atomu ^{235}U . Fyzikální vlastnosti vody zároveň zamezují, aby se intenzita štěpné reakce libovolně zvyšovala, neboť při vzrůstající teplotě vody se snižuje brzdící účinek neutronů.

5.4 Tlakovodní reaktory

5.4.1 Rozdělení

Reaktory III. generace v porovnání se svými předchůdci se vyznačují zjednodušenou konstrukcí a dělí se podle počtu chladících okruhů na jednookruhové, při výrobě páry, nebo více-okruhové, kde se teplo z reaktoru předává sekundárnímu médiu. Tyto reaktory ušetří tímto kolem 20 % paliva a o 15 % vyprodukují méně radioaktivního odpadu. Někdy se kvůli bezpečnosti vkládá mezi zmíněné dva okruhy ještě další okruh (např. v případě chlazení roztavenými solemi nebo tekutým sodíkem).

Další dělení je podle neutronového spektra na tepelné, které snižují kinetickou energii neutronu na vyšší úroveň pravděpodobnosti štěpení. V rychlých reaktorech vyvolají štěpení rychlé, nezpomalené, neutrony. Lehkovodní, moderované lehkou vodou (H_2O), těžkovodní, moderovaná těžkou vodou (D_2O) a grafitové je rozdělení podle druhu moderátoru. Použitím chladiva se rozdělují na reaktory chlazené plynem (většinou oxidem uhličitým nebo héliem), chlazené lehkou nebo těžkou vodou, chlazené organickými látkami, kde jsou chladivem polyfenyly a na závěr chlazené reaktory tekutým kovem (např. sodíkem v nejčastějším případě, olovem nebo jinými kovy). Na varné a tlakovodní reaktory rozlišujeme, jestli v aktivní zóně dochází k varu chladiva. IAEA (International Atomic Energy Agency) rozděluje současně používané reaktory podle tabulky 5.1.

Typ reaktoru	Moderátor	Chlazení	Označení
Tepelný	Lehká voda	H_2O	Tlakovodní (PWR)
			Varné (BWR)
	Grafit	CO_2	Plynem chlazené (GCR) a zdokonalené (AGR)
		He	Vysokoteplotní (HTGR)
		H_2O	Vodou chlazený (LWGR)
	Těžká voda	D_2O	Těžkovodní CANDU (PHWR)
		H_2O	Těžkovodní, chlazený obyčejnou vodou (HWLWR)
		CO_2	Těžkovodní, chlazený plynem (HWGCR)
Rychlý	Bez moderátoru	Na	Rychlý množinový (FBR)

Tab. 5.1: Základní rozdělení reaktorů podle IAEA

Podle štěpného materiálu může být další dělení. Použití uranu v přírodním nebo v obohaceném stavu. Odlišná je i chemická vazba štěpného materiálu, kde se používají kovový uran, karbid uranu (UC), oxid uranu (UO_2), popřípadě směs uranu a plutonia (MOX). Rozdělení je možné i podle formy paliva na heterogenní, kde se vyskytuje palivo ve formě palivových článků, a na homogenní, kde je rozptýlené nebo rozpuštěné přímo

v moderátoru. Řešení průtoku chladiva rozdělí podle konstrukčního uspořádání na reaktory s tlakovou nádobou (aktivní zóna a chladivo, řídicí tyče a vnitřní zařízení uvnitř nádoby), nebo s tlakovými kanálky (palivový článek v samostatné trubce).

5.4.2 Blok VVER 640

Petrohradský Atom energoprejekt ve spolupráci Gidropressem a Kurčatkovským institutem vypracovali technický projekt jaderné elektrárny VVER 640 v rámci státního programu „Ekologicky čistá energetika“. Projekt jaderné elektrárny se středním výkonem 640 MWe spadá do nové generace, přesto se v Rusku hledají další cesty, jak zvýšit bezpečnost jaderných elektráren a tím snížit riziko vyplývající z provozu. Elektrárna má zabudovaný reaktor V 407, jenž zahrnuje nové pasivní a inherentní bezpečnostní prvky. Ostatní technické parametry jaderné elektrárny jsou zapsány v tabulce 5.2.

Na konkursu s nejlepším návrhem energetických bloků byl kladně oceněn s hodnocením „doporučení – zdokonalený“. S kladným výsledkem byl také podroben expertize v německém GRS (Gesellschaft für Reaktor sicherheit mbH).

Blok se vyznačuje zvýšenou úrovní bezpečnosti za využití zkušeností z projektů VVER 440 a VVER 1000. Všechné pasivní systémy zajišťují bezpečnost jaderné elektrárny při havarijní situaci. Technickoekonomický ukazatel paliva, zdokonalení aktivní zóny, či optimalizace systému jsou dalšími způsoby vylepšení.

Od svých předchůdců se projekt VVER 640 liší těmito základními rysy:

- Použití dvojitého betonového kontejmentu.
- Zesílení betonových konstrukcí uvnitř obálky.
- Automatické odstavení a dochlazování reaktoru na bázi pasivních systémů pracujících i bez zásahu operátora.
- Kontrola těsnosti vnitřní ocelové obálky za provozu reaktoru.
- Možnost kompenzace reaktivity všech staveb (včetně neotráveného reaktoru bez boru v chladivu) do teploty 100 °C.
- Zvýšení účinnosti JE zvýšením nominálního tlaku páry na výstupu z PG na 7 MPa.
- Sofistikované řídicí systémy.

Typ reaktoru	V 407	1
Tepelný výkon	1800	MWt
Elektrický výkon	645	MWe
Účinnost bloku	33,4	%
Životnost reaktoru	60	let
Počet smyček I. okruhu	4	1
Tlak vody na výstupu z aktivní zóny	15,7	MPa
Tlak páry v PG	7,05	MPa
Tlak páry na vstupu do turbíny	6,9	MPa
Tlak v kondenzátoru	5	kPa
Teplota vody na vstupu do reaktoru	298,5	°C
Teplota vody na výstupu z reaktoru	330,7	°C
Otáčky turbíny	3000	min ⁻¹
Obohacení paliva	3,6	%
Střední vyhoření	40,4	MWdní / kg (U)

Tab. 5.2: Technické údaje jaderné elektrárny VVER 640

Technologie a systémy osvědčené u předchozích VVER, používají také elektrárny VVER 640. Životnost elektráren musí být projektována na minimálně 60 let, přičemž radiační působení na obyvatelstvo je bezpodmínečně nižší než 0,1 %. Skladování použitého paliva je skladováno v kontejneru po dobu pěti let. Zahrnutí projektu obsahuje i možnost umístění elektrárny v různých klimatických podmínkách s možnými přírodními jevy (například povodně, zemětřesení).

5.4.3 Evropský tlakovodní reaktor EPR III+

Až třicetileté provozní zkušenosti firem Siemens a Framatome, daly vznik evolučnímu projektu EPR od AREVA Group, charakterizující nejlepší technologie, zejména zlepšení bezpečnosti a zároveň konkurenceschopnost produktu. Udávaný výkon je 1600 MWe s účinností až 37%, jenž bude jedním z nejvýkonnějších tlakovodních reaktorů.

Hlavní součástí EPR jsou: tlaková nádoba, cirkulační čerpadla a PG, které se od dřívějšího designu zvětšily, což zvýší bezpečnost, operativnost a výkon. Aby porucha jedné sekce neovlivnila jinou, jsou bezpečnostní sekce fyzicky odděleny.

Zajímavým bezpečnostním prvkem je speciální nádoba, kde při roztečení aktivní zóny zachytí taveninu a následně ochladí vodu omývajícím nádobu. Proniknutím radioaktivity do okolního prostředí elektrárny se tímto plně zamezí. Budova reaktoru obsahuje vnější železobetonový plášť a je schopna vydržet mj. i pád dopravního letadla. Na obrázku 5.1 je zobrazen řez dvojitým kontejmentem reaktoru.

Životnost je projektována na 60 let bez výměny reaktorové nádoby. Díky projektování ostatních komponentů, mohou být nezávisle na sobě vyměněny. Používat se bude oxid uraničitý jako palivo obohaceným mírně uranem ^{235}U do 5%, nebo uran a plutonia (UO_2 a PuO_2) označen také MOX (Mixed Oxide Fuel). Vyhořování tohoto paliva by pak nemělo být větší než 60 GWd/t.



Obr. 5.1: Řez dvojitým kontejmentem reaktoru EPR III+

5.4.4 Americký tlakovodní reaktor AP-600 III+, 1000 III+

Dnes již do detailů propracovaný projekt tlakovodního reaktoru obsahující zvýšenou pasivní a inherentní bezpečnost. Čerpání ze zkušeností a dosavadních úspěchů v konstrukci firmy Westinghouse uplatňuje v maximální míře u palivového článku a aktivní zóny. Především je založeno pro splnění projektových cílů elektrárny s tlakovodním reaktorem AP-600, 1000 na podstatném zjednodušení všech systémů s využitím pasivních bezpečnostních systémů a modulového konstrukčního řešení.

Nouzové systémy chlazení a ochranné obálky prodělaly největší změny oproti konvenčním řešením, čímž se docílilo natolik automatizovaného systému, aby po třech dnech od těžké havárie nevyžadoval zásah obsluhujícího personálu. Po havárii by se kontejnment zaplavil vodou během prvních deseti hodin. Bez přívodu elektrické energie by chladicí vzduch mezerou mezi ocelovým a betonovým pláštěm kontejnmentu odváděl hromadící teplo. Koncentraci radioaktivních zplodin sníží pasivní sprchovací systém, jenž by využíval vodu s přídavkem kyseliny borité z nádrží. Zásadní změnou je chlazení vnějšího povrchu ochranné obálky přirozenou konvekcí vzduchem oproti dosavadním konstrukcím.

Elektrárna nemusí být vybavena filtračními systémy, nebo pojistným ventilem, protože je ochranná obálka zabezpečena před nekontrolovatelným zvýšením vnitřního tlaku. V tabulce 5.3 jsou popsány základní technická data a na obrázku 5.2 je vymodelovaná koncepce elektrárny AP-1000. Dvousmyčkové řešení PG připadají na každý reaktor, přes dvě studené, jednu teplou větev a čtyři napájecí čerpadla, přičemž výstupní teplota vedoucí z reaktoru pak bude 321 °C.

Tepelný výkon	3415 MWt
Elektrický výkon	1117 MWe
Počet smyček	2
Palivo	UO ₂ /MOX
Obohacení U-235	2,35 – 4,45 %

Tab. 5.3: Základní technická data jaderné elektrárny AP 1000 III+



Obr. 5.2: Koncepce jaderné elektrárny AP 1000 III+

6. IV. Generace jaderných elektráren

6.1 Historie projektu GIF

Ministerstvo energetiky v USA bylo důvodem založení programu GIF (Generation IV International Forum) v roce 1999. Hlavní podněty byly neustále rostoucí ceny elektřiny, zabránění globálního oteplování, což je spojeno se snížením emisí skleníkových plynů, zvyšování světové spotřeby energie a problémy s alternativními zdroji. Schůze GIF započala v lednu 2000, kdy US Department of Energy (DOE), úřad pro jadernou energii, vědu a techniku svolala skupina vysokých vládních představitelů z původních devíti zakládajících zemí, aby zahájila jednání o mezinárodní spolupráci při vývoji IV. generace jaderných energetických systémů. Členství zastupuje k dnešnímu dni 13 zemí, když v listopadu roku 2006 do programu jako poslední připojila Ruská federace s Čínskou lidovou republikou.

Mezinárodním fórum GIF se dlouhodobě zabývá soustředěným výzkumem a perspektivou jaderné energetiky. Oporou jsou jim doposud padesátileté zkušenosti v oblasti jaderné energetiky, kdy kromě nedostatků a problémů se snaží hodnotit i jejich převážné úspěchy v této oblasti, proto se klade důraz na odstranění v nejvyšší míře dosavadních nevýhod, při ekonomické konkurenceschopnosti jaderné energetiky. Další body a požadavky nadcházejícího vývoje a výzkumu jsou obsažené v dokumentu „A Technology Road map for Generation IV Nuclear Energy Systems“ viz. [1].

6.2 Požadavky na jaderné elektrárny IV. generace

Bezpečnost a zabránění šíření jaderných zbraní:

Snaha o robustní jednoduchou konstrukci s jasně daným chováním je jedním z nejdůležitějších bezpečnostních prvků. Hlavní důraz je zaměřen na pasivní bezpečnostní prvky založené na základních fyzikálních principech. Například dostatečně pevná konstrukce komplexu, která zajistí ochranu před útokem raketou i pádu letadla. Nezávisle na sobě pracující bezpečnostní prvky jsou zněkolikanásobněny. Čímž se docílí nahrazení vyřazeného prvku jiným.

Ekonomika:

Srovnání ekonomiky produkce využití jaderné energie a pomocí ostatních zdrojů je důležitým aspektem pro využití. Elektrickou energii už nyní současné jaderné elektrárny

vyrábějí za cenu levnější než u uhelných elektráren. Avšak je potřeba neustále zlepšovat ekonomické parametry jaderných elektráren. Srovnání cen výstavby a provozu patří k nemalé součásti výběru konkrétních používaných typů. Jednu z největší části nákladu tvoří převážně cena postavení jaderného reaktoru a v oblasti energie jádra lze docílit nejvýznamnějšího snížení finančních nákladů.

Délka a cena výstavby:

Standardizace modelů stavěny v dostatečných sériích, nebo modulární uspořádání, by přispěly nemalou hodnotou ke snížení cen zařízení a schvalovací řízení by nemuselo probíhat pro každou část a stavbu zvlášť. Doba projektování, schvalování a výstavby elektrárny by se tím pádem výrazně zkrátila a to by se odrazilo výrazným snížením nákladů.

Delší doba života reaktorů:

Během provozu elektrárny lze většinu zařízení renovovat a modernizovat čímž se dosáhne delší životnost a kvalita vybavení. Reaktorová nádoba je základní součást jaderného bloku, kterou nelze vyměnit, a proto určuje jeho celkovou životnost. Určuje jí hlavně odolnost proti negativním vlivům za provozu, například silným neutronovým polem vznikajícím při provozu reaktoru se zhoršují vlastnosti nádoby tímto vlivem. Proto se klade důraz na zmenšení tohoto ozáření neutrony směrem na stěny nádoby. Lze také použít více kvalitní materiály nádoby čímž se pochopitelně zvýší i její životnost. Životnost jaderných reaktorů IV. generace má dosahovat přibližně šedesáti let a jejich využitím by se celková efektivita zvýšila.

Provozní náklady a efektivita jaderné elektrárny:

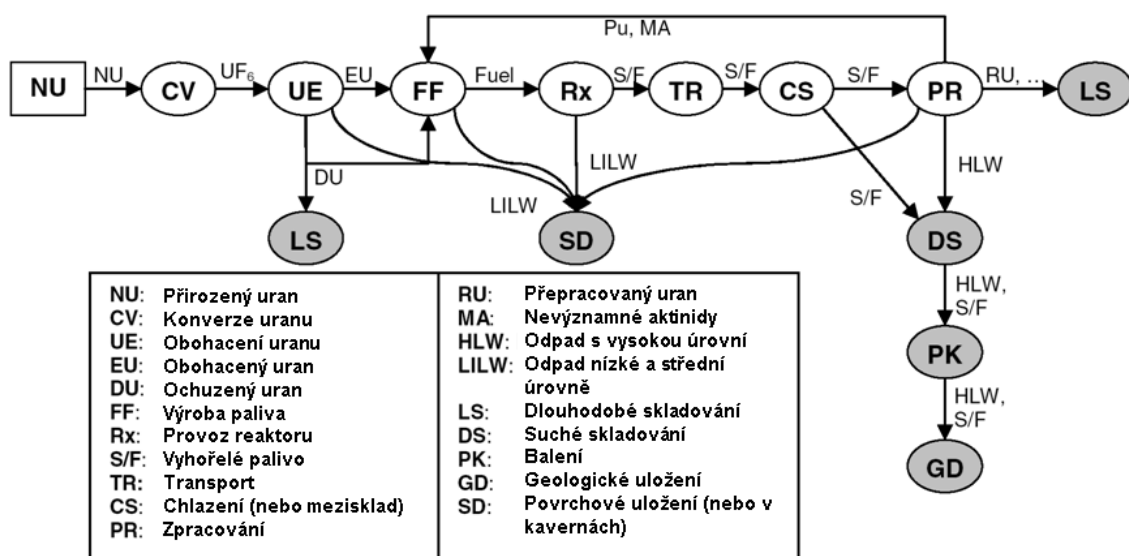
Důraz je kladen na zjednodušení obsluhy, které vede k zvýšení spolehlivosti, prodloužení intervalu mezi výměnami paliva a zkrácení potřebné doby na tuto výměnu. Zvýšením koeficientu využitelnosti elektrárny bychom dosáhli snížením plánovaných i neplánovaných odstávek. Možnosti jsou široké jako například při efektivní produkci tepla, pitné vody odsolováním a vodíku.

Vodíková energetika:

Produkce jiných forem energie než pouze elektrické by efektivním zapojením jaderné energetiky mohlo umožnit zavedení vodíkového hospodářství a využitím vodíku pro transport, průmysl i uchovávání energie. Předpokládaným nasazením termochemických metod, nebo vysokoteplotní elektrolýzy se bude produkce vodíku provádět efektivněji. Vysokoteplotní elektrolýzu lze také označit jako parní elektrolýza, kdy část dodané energie je přivedena ve formě tepla a druhou část tvoří elektrická energie. Dosáhne se tak celkově vyšší účinnost procesu oproti elektrolýze vody, jenž je menší až o 35%. Poté může účinnost výroby elektrické energie s celkovou účinností dosáhnout 45%.

Uzavřený palivový cyklus:

Většina reaktorů ve světě používá pouze jeden cyklus využití paliva a vyhořelé palivo se nerecykluje. Jen některé státy přepracovávají vyhořelé palivo a tím využívají recyklovaný uran a transurany (převážně plutonium 239). Transurany mají rozdílné pravděpodobnosti absorpce neutronu a štěpení, především pro neutrony s nízkou energií a proto je využití recyklace pouze omezené. Reaktory pracující s moderovanými neutrony nejsou doporučovány spalovat recyklované palivo, neboť jsou velmi citlivé na složení paliva. Proto použití rychlých reaktorů je výhodnější a musí se brát ohled při konstruování aktivní zóny reaktoru na předpokládané používané palivo. IV. generace obsahuje projekty plánovaných reaktorů, ve kterých se bude předpokládat efektivní spalování transuranů. V budoucnu se díky intenzivní recyklaci dosáhne uzavřeného palivového cyklu, jenž znázorňuje obrázek 6.1.



Obr. 6.1: Schéma palivového cyklu

Využití štěpitelného materiálu:

Nejefektivnější využití štěpného i štěpitelného materiálu úzce souvisí s uzavřeným palivovým cyklem, proto se objevuje v několika projektech rychlých reaktorů. V množivém režimu mohou pracovat a produkovat palivo ve formě plutonia 239 a dalších transuranů pro sebe, ale i pro klasické reaktory. Prioritou vývoje IV. generace reaktorů je vývoj využívání izotopů uranu 235, 238 a transuranů, doprovázející jejich spalování. V úvahu je třeba vzít pravděpodobnost reakce neutronů s izotopem thoria 232 a izotopy prvků, které vzniknou při využití v jaderném reaktoru.

Redukce radioaktivního odpadu:

Zmíněnou významnou redukcí radioaktivního odpadu by mělo umožnit přepracování vyhořelého jaderného paliva a spálením všech vznikajících transuranů v uzavřeném cyklu. Rychlé reaktory umožní štěpit všechny transurany v intenzivní neutronové pole. Čímž by se docílilo posílání do trvalých úložišť vysoce aktivních jaderných odpadů pouze dlouhodobě aktivní štěpné produkty. Toxicita, radioaktivita odpadů a objem by se proto mohl výrazně snížit a také by se i zredukovala velikost trvalých úložišť radioaktivního odpadu.

6.3 Výběr možných reaktorových systémů

Propracování technologií 6 typů jaderných reaktorů, vybraných z téměř sta možností budoucích reaktorů, pro nasazení po roku 2020 je jeden z cílů iniciativy. Vůči vysoké teplotě je umožněno vyrábět elektrickou energii s výrobou vodíku, jenž by měl v budoucnu nahradit dosavadní ropné produkty, především v dopravě. Požadavky na neustále zvyšování účinnosti jaderných reaktorů, můžeme rozdělit na dva typy. Buď účinnost v schopnosti přeměňovat tepelnou energii na mechanickou či elektrickou, nebo využívání stupně jaderného paliva. Uskupení GIF rozděluje reaktorové systémy následovně v tabulce 6.1 v souladu s literaturou [21]

Reaktorový systém	Neutrony	Palivový oběh	Rozměr	Aplikace	Věda/ Výzkum/ Objevy
Plynem chlazený rychlý reaktor GFR	Rychlé	Uzavřený	Střední	Elektřina, aktinoidové hosp., H ₂	Palivo, materiály, bezpečnost
Olovo-bismutem chlazený reaktor LFR	Rychlé	Uzavřený	Malý Střední Velký	Elektřina, aktinoidové hosp., H ₂	Palivo, materiálová kompatibilita (slučitelnost)
Tekutými solemi chlazený rychlý reaktor MSR	Tepelné	Uzavřený	Velký	Aktinoidové hosp., H ₂	Palivo, materiály, bezpečnost, spolehlivost
Sodíkem chlazený rychlý reaktor SFR	Rychlé	Uzavřený	Střední Velký	Elektřina, aktinoidové hosp.	Zdokonalení recyklace, pasivní bezpečnost, hraniční stavy
Superkritický lehkovodní reaktor SCWR	Tepelné Rychlé	Otevřený Uzavřený	Velký	Elektřina	Vysokoteplotní materiály, kompozity, keramika
Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor VHTR	Tepelné	Otevřený	Střední	Elektřina, H ₂ , odpadní teplo	Palivo, materiály, produkce vodíku

Tab. 6.1: Rozdělení reaktorových systémů IV. generace

Výhody a nevýhody se týkají každého uvedeného systému a jen budoucí vývoj dokáže, který z těchto reaktorů rozhodne v úloze jaderné energetice v nepříliš vzdálené budoucnosti.

7. Primární okruh jaderné elektrárny

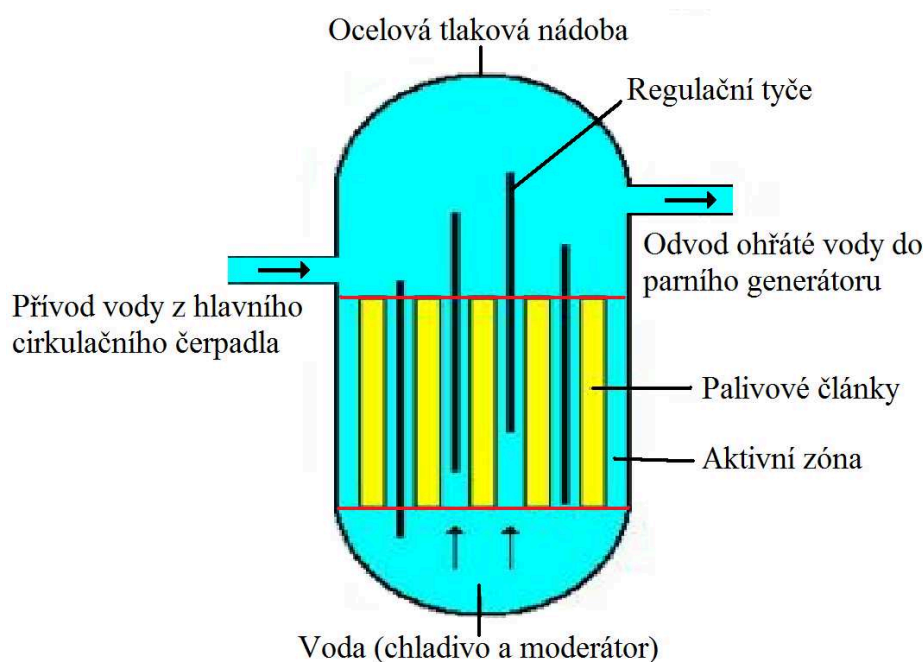
Odvod teponosného média z reaktoru do tepelného výměníku (parního generátoru) dochází v primárním okruhu jaderné elektrárny a následně se tepelná energie předá sekundárnímu okruhu. Do reaktoru se vrací ochlazené médium z PG, kde se následně zase ohřeje.

Popis částí primárního okruhu:

Jaderný reaktor:

Je zařízení, ve kterém probíhá řetězová jaderná reakce, která se udržuje a kontroluje ve stabilním běhu. Energie uvolněná při jaderném štěpení se přemění na tepelnou energii, kterou odvádí voda protékajícím reaktorem a tím i ochlazuje aktivní zónu. Voda se používá i jako moderátor reaktoru pro zpomalování neutronů. Palivo reaktoru slouží obohacený uran ve formě oxidu uraničitého UO_2 . Tento diplomový projekt se zabývá PG typu VVER (lehkovodní tlakový reaktor), nebo také známým pod zkratkou PWR (Pressurized Water Reactor).

Výše uvedený nejpoužívanější typ reaktoru využívají i jediné dvě jaderné elektrárny (Temelín, Dukovany) v České Republice. Schéma jaderného reaktoru je vyobrazeno na obrázku 7.1.



Obr. 7.1: Schéma jaderného reaktoru

Regulační tyče:

Řídí rychlost jaderné reakce zasouváním do reaktoru. Regulují množství volných neutronů, tím i průběh štěpení a výkon reaktoru. Mimo jiné složí jako bezpečnostní prvek, neboť přebytek neutronu by mohl vyvolat neřízenou štěpnou reakci a posléze i možnou havárii. Pro absorpci přebytečných neutronu se převážně používá materiál regulačních tyčí kadmium.

Aktivní zóna:

Palivo a štěpná reakce, probíhá v aktivní zóně. Vzniklé teplo je následně odváděno chladivem k PG.

Parní generátor:

Důležitou součástí systému jaderné elektrárny je zařízení k výrobě páry – parní generátor, ke kterému se vztahuje předkládaná diplomová práce. Je to tepelný výměník, ve kterém dochází k převodu tepelné energie radioaktivního primárního okruhu do neaktivního sekundárního okruhu jaderné elektrárny. Tlak je zde nižší než v primárním okruhu, čímž vznikne pára proudící následně do turbíny.

V tomto případě se konkrétně jedná o vodovodní typ s tepelným výkonem 450 MW ve čtyřsmyčkovém uspořádání.

Kompenzátor objemu:

Vlivem tepelných dilatací chladiva dochází k tlakovým změnám primárního okruhu. Kompenzátor objemu je vodní nádrž, jenž vyrovnává tlakové změny a doplňuje nebo odebírá chladivo při změnách objemu v primárním okruhu.

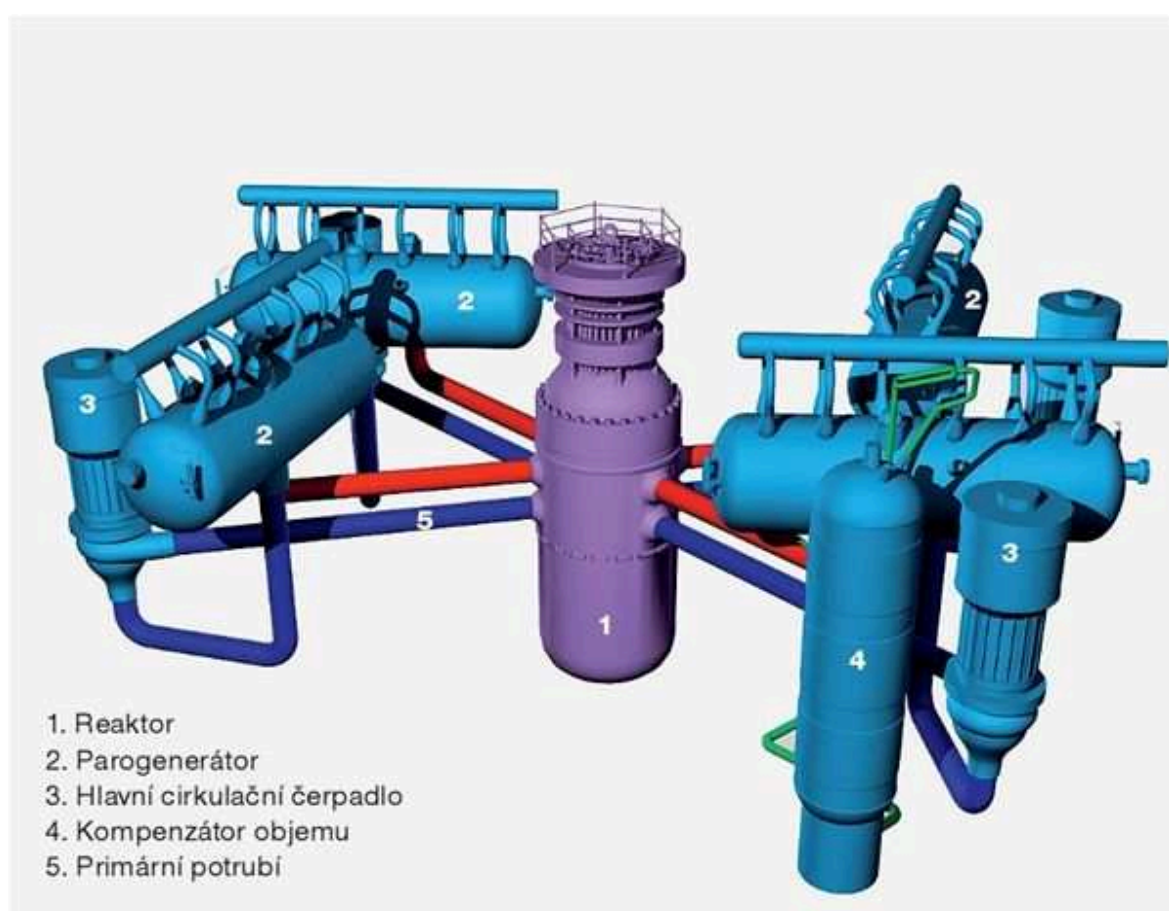
Kompenzátor objemu je rozdělen na vodní a parní prostor. S horkou částí větve jedné ze smyček primárního okruhu je trvale spojen vodní prostor. Nad hladinou je parní polštář, s jehož pomocí dochází k vyrovnávání tlaku. Při snížení tlaku se automaticky zapnou ohřívačky vody a způsobí stoupání tlaku za pomoci vývinu páry v kompenzátoru objemu. Při dosažení předepsaného tlaku se ohřívačky automaticky vypnou. Naopak při zvýšení tlaku se otevře regulační ventil, dochází k rozprašování studené vody tryskami do parního prostoru kompenzátoru objemu a poklesu tlaku následnou kondenzací páry.

Hlavní cirkulační čerpadlo:

Mezi reaktorem a PG zajišťuje proudění chladiva. Z důvodu vysokých tlaků, teploty a radioaktivity vody, patří k technologicky nejnáročnějším čerpadlům v jaderné elektrárně.

Čtyřsmyčkové uspořádání primárního okruhu JE VVER 640:

Každá smyčka obsahuje PG, hlavní cirkulační čerpadlo, které je umístěno v chladnější větvi smyčky. Pomocí uzavření hlavních uzavíracích armatur lze při poruše celou smyčku vyřadit z provozu. Na obrázku 7.2 je zobrazen 3D pohled na zmíněný primární okruh.



Obr. 7.2: Čtyřsmyčkové uspořádání primárního okruhu jaderné elektrárny

8. Popis parního generátoru

PG slouží k výrobě páry, která vzniká prouděním teplonositele, jenž ochlazuje jaderný reaktor a předává svou tepelnou energii sekundárnímu médiu. Energetické parametry PG jsou vstupní teplota, výstupní teplota a tlak primárního média, tepelný a parní výkon, tlak a teplota sekundárního média a čistota páry. Velikost tepelných ztrát do okolí není příliš velká a pohybuje se v rozmezí 1-2 % tepelného výkonu.

Požadavky a kritéria pro stavbu PG:

- Zajistit projektovaný výkon, parametry páry a bezpečný provoz při různých režimech jaderné elektrárny.
- Všechny části musí mít vysokou spolehlivost a bezpečnost.
- Požadovaná životnost je minimálně 60 let.
- Spoje musí být dokonale těsné, aby byla vyloučena možnost proniknutí radioaktivního teplonositele do pracovní látky a naopak.
- PG je třeba navrhnout tak, abychom předešli vznikům korozních produktů.
- Konstrukce a koncepce PG musí dovolovat snadnou montáž, opravu, dokonalé vypuštění jeho primární i sekundární strany a snadný bezporuchový provoz.

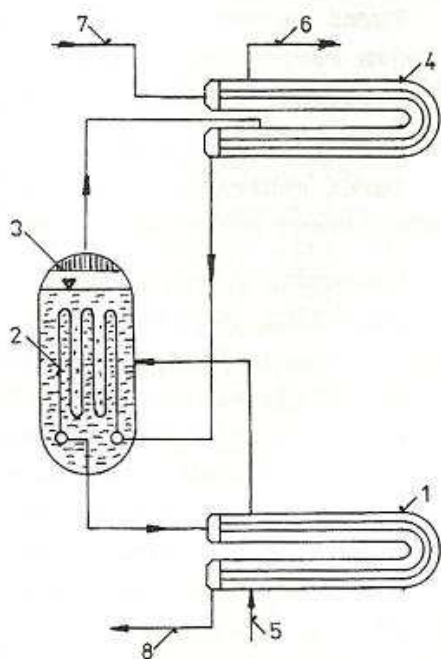
Existuje mnoho konstrukčních řešení PG. Je to dáno typem reaktoru, požadovaným tepelným výkonem, parametry primárního média. Proto obsahuje širokou škálu možností při volbě jednotlivých konstrukčních parametrů a elementů na straně tohoto média.

Horizontální PG pro tlakovodní reaktory VVER:

Trubky tvaru „U“ vedou teplonositelné médium do kolektorů nacházejících se ve střední části tělesa. Pro případ kontroly či opravy slouží na horní části kolektoru umístěná mechanická odnímatelná víka. Teplonosné trubky jsou ve svazcích ponořeny v sekundární vodě. Pod hladinou sekundární vody jsou ve svazcích ponořené teplonosné trubky.

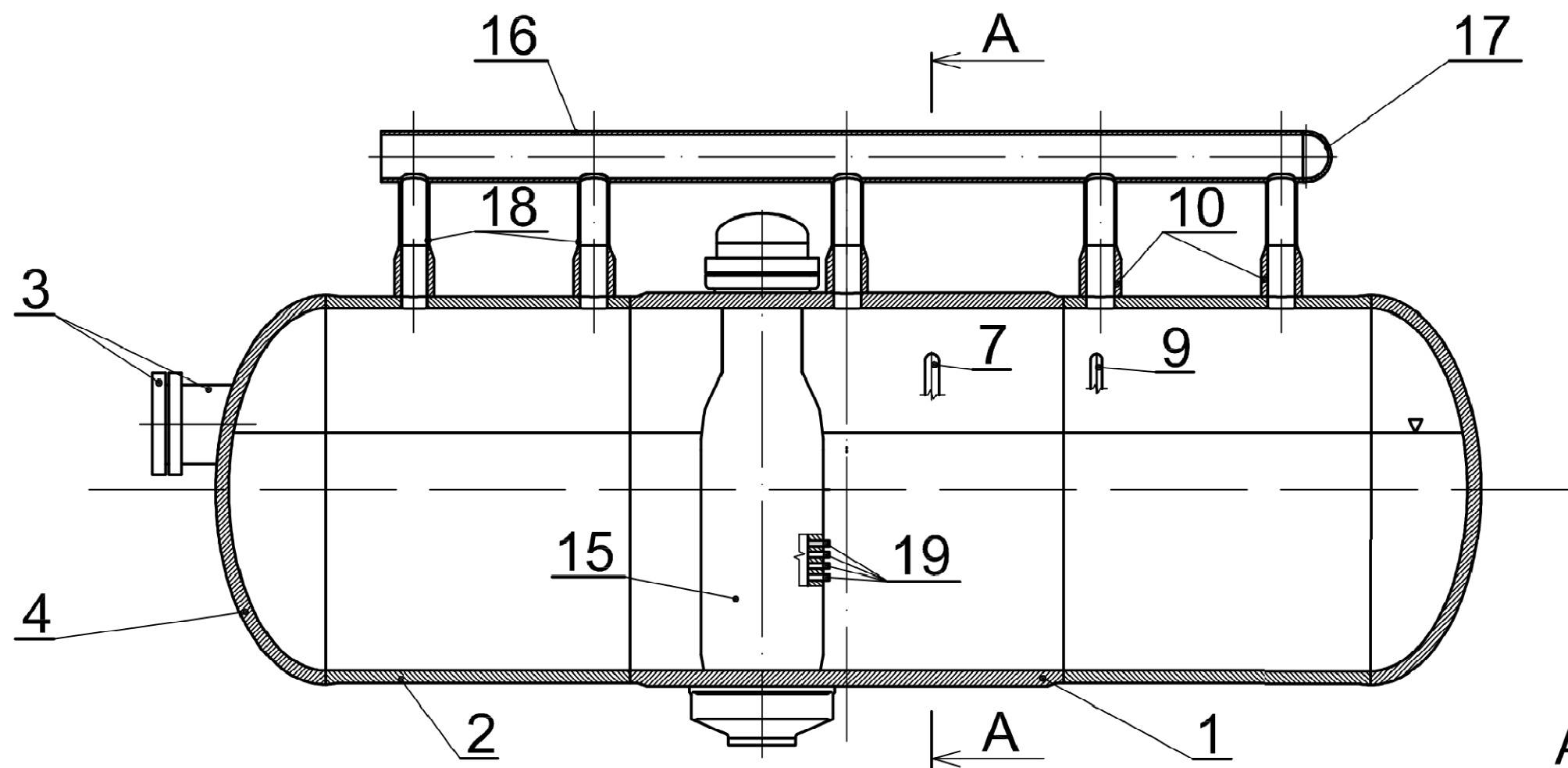
Do tělesa je nátrubkem přiváděna sekundární napájecí voda a posléze rozdělovacím kolektorem napájecí vody rozdělena do teplejší poloviny svazku trubek, čímž se reguluje parní zatížení hladiny vody. Snížení parního výkonu a suchosti páry se dosáhne přívodem napájecí vody pod hladinou. Mezi trubkami svazku probíhá přirozená cirkulace sekundární vody.

V horní části PG se nalézá žaluziový separátor páry, ve kterém se pára uvolněná z hladiny sekundárního média zbavuje vlhkosti. Následně vystupuje nátrubky do výstupního kolektoru páry. Neustálý odluh a odkal, zajišťující předepsanou kvalitu páry, se provádí nátrubky, umístěnými na dně PG sekundární strany. Celkové schéma je vyobrazeno na obrázku 8.1.



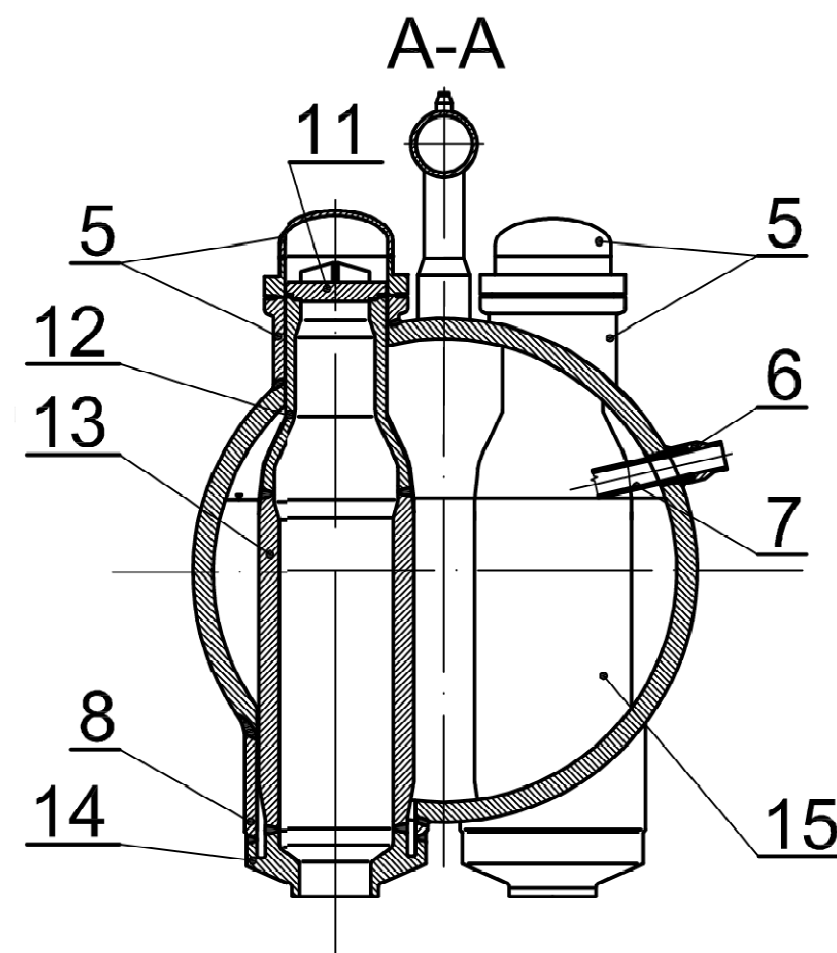
- 1 – ekonomizér (dohřívací část)
- 2 – výparník (výparníková část)
- 3 – separátor vlhkosti (separátor páry)
- 4 – přehřívák (přehřívák páry)
- 5 – přívod napájecí vody
- 6 – odvod páry
- 7 – přívod teplosměnného média
- 8 – odvod teplosměnného média

Obr. 8.1: Schéma PG



1. Střední kroužek pláště
2. Boční kroužek pláště
3. Eliptické dno pláště
4. Víko a nárubek průlezu PG
5. Víko a nárubek průlezu II. okruhu
6. Nárubek napájecí vody
7. Trubka napájecí vody
8. Nárubek $\varnothing 1105$ mm
9. Nárubek přívodu havarijní vody
10. Nárubek páry na plášti

11. Víko vstupního kolektoru I. okruhu
12. Horní válcová a kuželová část
13. Děrovaná válcová část vstupního kolektoru
14. Přejímový prstenec
15. Výstupní kolektor I. okruhu
16. Válcová část kolektoru páry
17. Kulové dno kolektoru páry
18. Nárubek kolektoru páry
19. Trubky kolektoru I. okruhu



9. Tepelný výpočet parního generátoru

K zhotovení výpočtu posloužili literatury [5,10,11,12] a tabletované hodnoty odečteny pomocí programu EES. Tepelný výkon PG dostaneme podělením tepelného výkonu jaderné elektrárny, počtem PG. Jelikož je čtyřsmýčkové uspořádání primárního okruhu, bude toto číslo 4.

Některé zadané hodnoty byly upraveny vedoucím diplomové práce.

- **Zadané parametry PG:**

Tepelný výkon jaderné elektrárny	$Q_R = 1800 \text{ [MWt]}$
Tepelný výkon PG	$Q_{PG} = 450 \text{ [MW]}$
Tlak v I. Okruhu	$p_I = 15,7 \text{ [MPa]}$
Tlak syté páry	$p_{II} = 7,05 \text{ [MPa]}$
Teplota média v I. Okruhu – na vstupu	$t_{I,1} = 330,7 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Teplota média v I. Okruhu – na výstupu	$t_{I,2} = 298,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Teplota napájecí vody	$t_{NV} = 220 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Účinnost PG	$\eta_{PG} = 98 \text{ [%]}$

- **Střední teplota I. Média:**

Pro výpočty přestupu tepla z primárního média stěny trubky uvažujeme jeho střední teplotu, která se získá aritmetickým průměrem vstupní a výstupní teploty v daném úseku.

$$t_{I,St} = \frac{t_{I,1} + t_{I,2}}{2} \quad [^\circ\text{C}] \quad (9.1)$$
$$t_{I,St} = \frac{330,7 + 298,5}{2} = 314,6 \quad [^\circ\text{C}]$$

- **Charakteristiky primárního média při jeho střední teplotě a tlaku 15,7 MPa:**

Hustota	$\rho_{I,St} = 694,7 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]}$
Měrný objem	$v_{I,St} = 0,001439 \text{ [m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\text{]}$
Dynamická viskozita	$\eta_{I,St} = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$
Kinematická viskozita	$\nu_{I,St} = 1,19 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$
Prandlovo kritérium	$Pr_{I,St} = 0,9455 \text{ [1]}$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{I,St} = 0,5165 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\text{]}$

- **Entalpie primárního média:**

$$\text{Entalpie primárního média – na vstupu} \quad i_{l,1} = 1520 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$\text{Entalpie primárního média – na výstupu} \quad i_{l,2} = 1329 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

- **Entalpie sekundárního média:**

$$\text{Entalpie napájecí vody} \quad i_{NV} = 943,5 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$\text{Entalpie syté vody} \quad i' = 1270 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$\text{Entalpie syté páry} \quad i'' = 2771 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

9.1 Počet trubek a celková průtočná plocha primárního média

Celkovou teplosměnnou plochu PG tvoří svazek trubek o rozměru $\varnothing 16 \times 1,5$ mm. Tudíž průtok primárního média, z něhož je odvozen počet trubek, je přímo úměrný tepelnému výkonu PG a nepřímo úměrný rozdílu vstupní a výstupní entalpie teplotonosné plochy.

- Zvolené parametry podle literatury [8] potřebné pro další výpočty, kde střední rychlost proudění primárního média se volí mezi $3,0 - 4,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a průměr trubky je zadán.

$$\text{Střední rychlost proudění primárního média} \quad w_{l,(t)} = 4 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\text{Vnitřní průměr trubky} \quad d_1 = 13 \text{ [mm]}$$

$$\text{Vnější průměr trubky} \quad d_2 = 16 \text{ [mm]}$$

- **Průtok I. Média:**

$$\dot{m}_I = \frac{\dot{Q}_{PG}}{(i_{l,1} - i_{l,2}) \cdot \eta_{PG}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9.2)$$

$$\dot{m}_I = \frac{450000}{(1520 - 1329) \cdot 0,98} = 2404,10 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- **Celková teoretická průtočná plocha I. Média:**

$$S_{I,C(t)} = \frac{\dot{m}_I}{w_{l,(t)} \cdot \rho_{I,St}} \quad [\text{m}^2] \quad (9.3)$$

$$S_{I,C(t)} = \frac{2404,10}{4 \cdot 694,7} = 0,865 \quad [\text{m}^2]$$

- **Průtočná plocha jedné trubky:**

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad [m^2] \quad (9.4)$$

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4} = 1,33 \cdot 10^{-4} \quad [m^2]$$

- **Teoretický celkový počet trubek:**

$$n_{tr(t)} = \frac{S_{1,C(t)}}{S_{tr}} \quad [1] \quad (9.5)$$

$$n_{tr(t)} = \frac{0,865}{1,33 \cdot 10^{-4}} = 6518,07 \quad [1]$$

- **Skutečný celkový počet trubek:**

K vůli možným budoucím zavařováním (například poškozením) a zanášením trubek se musí navýšit vypočtené množství trubek o 10 %.

$$n_{tr} = n_{tr(t)} \cdot 1,1 \quad [1] \quad (9.6)$$

$$n_{tr} = 6518,07 \cdot 1,1 = 7170 \quad [1]$$

- **Skutečná celková průtočná plocha:**

$$S_{1,C} = n_{tr} \cdot S_{tr} \quad [m^2] \quad (9.7)$$

$$S_{1,C} = 7170 \cdot 1,33 \cdot 10^{-4} = 0,952 \quad [m^2]$$

- **Skutečná střední rychlost proudění I. Média při jeho střední teplotě:**

$$w_I = \frac{m_I}{S_{1,C} \cdot \rho_{I,St}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (9.8)$$

$$w_I = \frac{2404,10}{0,952 \cdot 694,7} = 3,64 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Z důvodu různých délek trubek budou v jednotlivých částech (trubkách) různé rychlosti proudící vody. Vypočtená střední rychlost je tedy aritmetickým průměrem odlišných pro celý PG.

9.2 Součinitel přestupu tepla mezi vnitřní stěnou trubky a primárním médiem

Součinitel přestupu tepla je určen na základě kritériálních rovnic, které se pro tepelnou konvekci upravují do tvaru:

$$Nu = f(Pe, Re, Gr)$$

Nu	Nusseltovo kritérium
Pe	Pecletovo kritérium
Re	Reynoldsovo kritérium
Gr	Grashofovo kritérium

Z teorie podobnosti byly určeny vtahy pro výpočet jednotlivých kritérií. Tato podobnost v tepelné konvekci znamená tepelných toků a teplotních polí.

Při výpočtu Reynoldsova kritéria je třeba určit charakteristický rozměr, který je dán vnitřním průměrem trubky. Velikost tohoto kritéria nám určí, jestli se jedná o laminární proudění ($Re < 2320$) či turbulentní ($Re > 10^4$), na čemž je závislý způsob výpočtu Nusseltova kritéria.

Fyzikální charakteristiky, obsažené v jednotlivých kritériích jsou funkcí teploty. Ve výpočtech je dodržována aritmetický průměr teplot charakterizujících přestup tepla prouděním.

- **Reynoldsovo číslo:**

$$Re_{I,St} = \frac{w_I \cdot d_1}{\nu_{I,St}} \quad [1] \tag{9.9}$$

$$Re_{I,St} = \frac{3,64 \cdot 0,013}{1,19 \cdot 10^{-7}} = 397249,81 \quad [1]$$

Reynoldsovo číslo vychází vyšší než 10^4 , proto se jedná o turbulentní proudění.

- **Teplota syté páry při tlaku 7,05MPa:**

$$\text{Odečteno: } t_{II} = 286,3 \quad [^{\circ}C]$$

- ***Teoretická střední teplota stěny trubky:***

$$t_{tr,St(t)} = \frac{t_{I,St} + t_{II}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (9.10)$$

$$t_{tr,St(t)} = \frac{314,6 + 286,3}{2} = 300,45 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- ***Prandlovo kritérium při střední teplotě trubky:***

Nusseltova kritérium bylo potřeba stanovit pro výpočet Prandlova kritéria Pr_{trSt} , které se rovná střední teplotě stěny trubky a dán je aritmetickým průměrem střední teploty primárního média a teploty sekundárního média.

Určeno z programu EES: $Pr_{trSt} = 0,9455$

- ***Nusseltovo kritérium:***

Hodnota Reynoldsova čísla je vyšší než 10^4 , jedná se tedy o omývání podélné a použijeme proto vztahu:

$$Nu_{I,St} = 0,021 \cdot Re_{I,St}^{0,8} \cdot Pr_{I,St}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{I,St}}{Pr_{tr,St}} \right)^{0,25} \quad [1] \quad (9.11)$$

$$Nu_{I,St} = 0,021 \cdot 397249,81^{0,8} \cdot 0,9455^{0,43} \cdot \left(\frac{0,9455}{0,8798} \right)^{0,25} = 588,46 \quad [1]$$

- ***Součinitel přestupu tepla na straně primárního média:***

$$\alpha_I = Nu_{I,St} \cdot \frac{\lambda_{I,St}}{d_1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (9.12)$$

$$\alpha_I = 588,46 \cdot \frac{0,5165}{0,013} = 23380,99 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

9.3 Součinitel přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a sekundárním médiem

- *Výpočtová konstanta A:*

$$A = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (t_{II} - 100)} \quad [1] \quad (9.13)$$

$$A = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (286,3 - 100)} = 8,746 \quad [1]$$

- *Součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média:*

Výpočtem součinitele přestupu tepla mezi parovodní směsí a vnější stěnou trubky musíme znát hodnotu hustoty tepelného toku. Ta se nejprve odhadne a po následujících výpočtech je posouzena míra správnosti odhadu. Toleranční mez je dána 1 %. Jestliže není odhad přesný v daném rozmezí, iterujeme získanou hodnotu tepelného toku až do momentu, kdy se dosáhne požadovaná přesnost.

Iterační metodou je stanoven střední tepelný tok: $q_{St(t)} = 147479 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$\alpha_{II} = A \cdot q_{St(t)}^{0,7} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (9.14)$$

$$\alpha_{II} = 8,746 \cdot 147479^{0,7} = 36301,83 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

9.4 Střední logaritmická teplota

- *Teplotní rozdíl mezi vstupujícím I. Médíem a II. Médíem:*

$$\Delta t_1 = t_{I,1} - t_{II} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (9.15)$$

$$\Delta t_1 = 330,7 - 286,3 = 44,4 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- *Teplotní rozdíl mezi vystupujícím I. Médíem a II. Médíem:*

$$\Delta t_2 = t_{I,2} - t_{II} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (9.16)$$

$$\Delta t_2 = 298,5 - 286,3 = 12,2 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

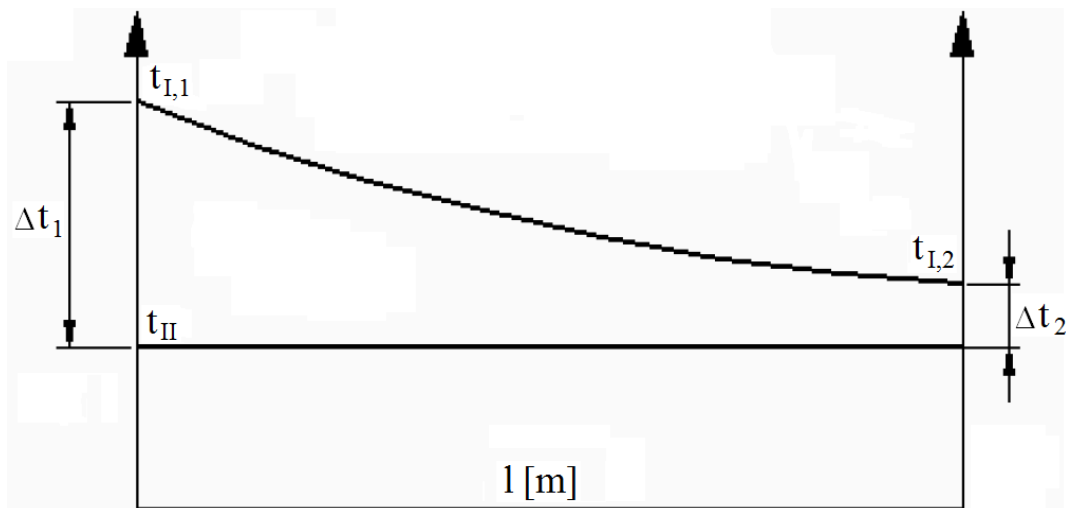
- ***Střední logaritmický teplotní spád:***

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (9.17)$$

$$\Delta t_{\ln} = \frac{44,4 - 12,2}{\ln \frac{44,4}{12,2}} = 24,93 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- Schéma průběhu teplot primárního a sekundárního okruhu PG:

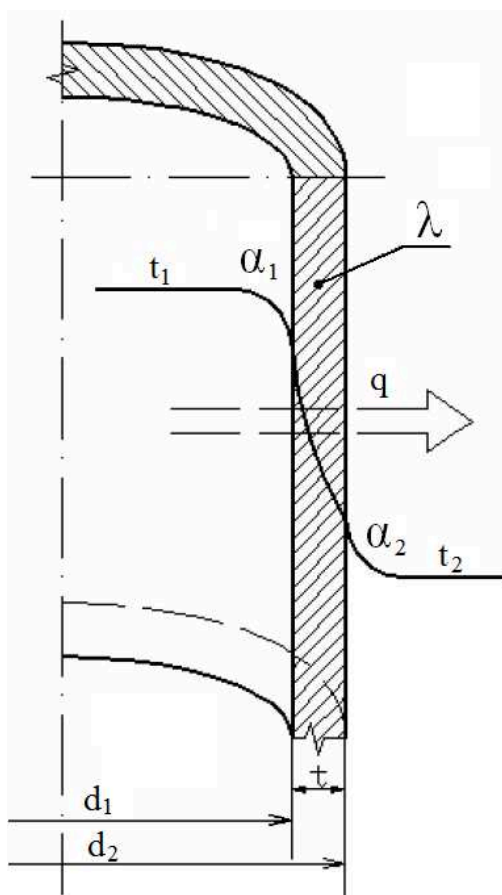
Vrchní teplotní křivka ohraničená teplotami $t_{I,1}$ a $t_{I,2}$ je průběh teplot primárního média po celé délce PG. Dolní úsečka t_{II} označuje teplotu parovodní směsi v PG.



Obr. 9.1: Průběh teplot I a II média v PG

9.5 Součinitel prostupu tepla

Pro teplosměnné korozivzdorné trubky je zvolen materiál 08Ch18N10T - nerezavící austenitická nikelchromovaná ocel, jehož součinitel tepelné vodivosti je $\lambda_{tr} = 18,70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



Prostup tepla probíhá konvekcí na vnitřní ploše trubky, kondukcí stěnou trubky s tepelnou vodivostí λ , tloušťce t a ukončuje jí konvekce na vnější ploše trubky.

Přenos tepelného výkonu je omezen tepelnou bariérou představující odpor stěny trubky (popřípadě obrácená hodnota tepelné vodivosti materiálu stěny) a tepelné odpory k ní přilehlých přechodových pásem.

Obr. 9.2: Přestup tepla válcovou stěnou

- **Výsledný součinitel prostupu tepla mezi teplotonositelem a parovodní směsí:**

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_r} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (9.18)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{23380,99} \cdot \frac{0,016}{0,013} + \frac{0,016}{2,18,7} \cdot \ln \frac{0,016}{0,013} + \frac{1}{36301,83}} = 5916,59 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

- **Měrný střední tepelný tok stěnou:**

Následující výpočet je pouze kontrolou dříve navržené hodnoty hustoty tepelného toku, potřebnou pro určení součinitele přestupu tepla α_{II} .

$$q_{St} = k \cdot \Delta t_{ln} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (9.19)$$

$$q_{St} = 5916,59 \cdot 24,93 = 147479,28 \quad [W \cdot m^{-2}]$$

- **Relativní chyba volené hodnoty středního tepelného toku vzhledem k vypočítané:**

$$\Delta q_{\text{Rel}} = \left| \frac{\Delta q_{St(t)} - \Delta q_{St}}{\Delta q_{St}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (9.20)$$

$$\Delta q_{\text{Rel}} = \left| \frac{147479 - 147479,28}{147479,28} \right| \cdot 100 = 0,0002 \quad [\%]$$

Kontrola navržené teploty stěny:

- **Teplo sdělené 1m stěny trubky:**

$$q_{lSt} = q_{St} \cdot d_2 \cdot \pi \quad [W \cdot m^{-1}] \quad (9.21)$$

$$q_{lSt} = 147479,28 \cdot 0,016 \cdot \pi = 7413,12 \quad [W \cdot m^{-1}]$$

- **Povrchová teplota stěny trubky na straně I. média:**

$$t_{trI} = t_{l,st} - \frac{q_{lSt}}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_I \cdot d_1} \quad [^{\circ}C] \quad (9.22)$$

$$t_{trI} = 314,6 - \frac{7413,12}{\pi} \cdot \frac{1}{23380,99 \cdot 0,013} = 306,84 \quad [^{\circ}C]$$

- **Povrchová teplota stěny trubky na straně II. média:**

$$t_{trII} = t_{II} - \frac{q_{lSt}}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_{II} \cdot d_2} \quad [^{\circ}C] \quad (9.23)$$

$$t_{trII} = 286,3 - \frac{7413,12}{\pi} \cdot \frac{1}{36301,83 \cdot 0,016} = 290,36 \quad [^{\circ}C]$$

- **Střední teplota stěny trubky:**

$$t_{trSt} = \frac{t_{trI} + t_{trII}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (9.24)$$

$$t_{trSt} = \frac{306,84 + 290,36}{2} = 298,60 \quad [^{\circ}C]$$

- **Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky:**

$$\Delta t_{\text{rel}} = \left| \frac{\Delta t_{trSt(t)} - \Delta t_{trSt}}{\Delta t_{trSt}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (9.25)$$

$$\Delta t_{\text{rel}} = \left| \frac{300,45 - 298,60}{298,60} \right| \cdot 100 = 0,62 \quad [\%]$$

9.6 Velikost teplosměnné plochy a střední délky trubky

Základním výpočtem měrné hustoty tepelného toku a požadovaného celkového tepelného výkonu PG, je odvozena potřebná teplosměnná plocha, ze které se stanoví celková délka trubek.

- **Celková teplosměnná plocha:**

$$S = \frac{Q_{PG}}{q_{St}} \quad [m^2] \quad (9.26)$$

$$S = \frac{450 \cdot 10^6}{147479,28} = 3051,28 \quad [m^2]$$

- **Celková délka trubek PG:**

$$L_{trC} = \frac{S}{\pi \cdot d_2} \quad [m] \quad (9.27)$$

$$L_{trC} = \frac{3051,28}{\pi \cdot 0,016} = 60703,21 \quad [m]$$

- **Délka střední trubky:**

$$L_{tr} = \frac{L_{trC}}{n_{tr}} \quad [m] \quad (9.28)$$

$$L_{tr} = \frac{60703,21}{7170} = 8,47 \quad [m]$$

9.7 Tepelný a parní výkon PG

- **Výparné teplo:**

$$l_v = i'' - i' \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (9.29)$$

$$l_v = 2771 - 1270 = 1501 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

- **Parní výkon PG při teplotě napájecí vody $t = 220^\circ C$:**

$$G = \frac{Q_{PG}}{l_v + 1,01 \cdot (i' - i_{NV})} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (9.30)$$

$$G = \frac{450000}{1501 + 1,01 \cdot (1270 - 943,5)} = 245,80 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

- **Skutečný tepelný výkon:**

$$Q_{PG,Sk} = G \cdot (i'' - i_{NV}) \quad [kW] \quad (9.31)$$

$$Q_{PG,Sk} = 245,80 \cdot (2771 - 943,5) = 449197,47 \quad [kW]$$

- **Kontrola vypočteného skutečného tepelného výkonu vzhledem k zadanému:**

$$\Delta Q_{PG,rel} = \left| \frac{Q_{PG} - Q_{PG,Sk}}{Q_{PG,Sk}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (9.32)$$

$$\Delta Q_{PG,rel} = \left| \frac{450000 - 449197,47}{449197,47} \right| \cdot 100 = 0,179 \quad [\%]$$

Odklon je dostatečně vyhovující.

10. Tepelné zatížení teplosměnné plochy po délce trubky

Výpočet byl proveden v souladu s literaturou [5,9,10,11,12]. Pomocí ESS byly odečteny tabletované hodnoty. Pro ulehčení výpočtů byl použit tabulkový editor Excel.

Podíl teplotních rozdílů $\Delta t_1/\Delta t_2$ je poměrně velký (~ 4), tudíž musí být teplosměnná plocha rozdělena na několik úseků, což zajistí přesnější tepelné zatížení. Teplotní spád teplonositele $\Delta t_i = t_{i,1} - t_{i,2} = 330,7 - 298,5 = 32,2 \text{ }^\circ\text{C}$ je rozdělen na osm úseků. Sedm úseků po $4 \text{ }^\circ\text{C}$ a jedno $4,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ve výpočtech vycházíme z konstantní teploty napájecí vody t_{NV} ve všech úsecích a konstantního průtočného množství teplonosného primárního média PG m_i všemi uvažovanými úseky. Pro výpočet jednotlivých úseků je použit stejný postup jako v předcházející kapitole.

Výsledné hodnoty úsekového tepelného výpočtu:

- ***Celkový parní výkon:***

$$\begin{aligned} G &= \Sigma G_i \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ G &= 33,46 + 33,46 + 30,89 + 30,89 + 29,60 + \\ &29,60 + 28,31 + 29,60 = 245,8 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned} \quad (10.1)$$

- ***Celková potřebná teplosměnná plocha:***

$$\begin{aligned} S &= \Sigma S_i \quad [\text{m}^2] \\ S &= 221,51 + 248,48 + 260,28 + 299,95 + 338,14 + \\ &409,09 + 493,13 + 698,87 = 2969,45 \quad [\text{m}^2] \end{aligned} \quad (10.2)$$

- ***Celková délka střední trubky:***

$$\begin{aligned} L_{tr} &= \Sigma L_{tri} \quad [\text{m}] \\ L_{tr} &= 0,615 + 0,689 + 0,722 + 0,832 + 0,938 + \\ &1,135 + 1,368 + 1,939 = 8,239 \quad [\text{m}] \end{aligned} \quad (10.3)$$

Název veličiny	Značka	Výpočet hodnoty	Jednotka
Průtok teplonositele PG	\dot{m}_I	$\frac{Q_{pg}}{\Delta i_I \cdot \eta_{PG}}$	[kg.s ⁻¹]
Teplota teplonositele na vstupu do pásma	$t_{I,1}$	Tepelný výpočet (str. XX)	[C°]
Teplota teplonositele na výstupu do pásma	$t_{I,2}$	Tepelný výpočet (str. XX)	[C°]
Rozdíl teplot	Δt_I	$t_1 - t_2$	[C°]
Průměrná teplota teplonositele v daném pásmu	$t_{I,st}$	$\frac{t_{I,1} - t_{I,2}}{2}$	[C°]
Entalpie teplonositele na vstupu do pásma	$i_{I,1}$	Tabletována	[kJ.kg ⁻¹]
Entalpie teplonositele na výstupu z pásma	$i_{I,2}$	Tabletována	[kJ.kg ⁻¹]
Tepelný výkon daného pásma	Q	$\dot{m} \cdot \Delta t_I \cdot \eta_{PG}$	[MW]
Teplota napájecí vody	t_{NV}	Zadána	[C°]
Entalpie napájecí vody	i_{NV}	Tabletována	[kJ.kg ⁻¹]
Teplota syté páry	t_{II}	Tabletována	[C°]
Výparné teplo	l_v	$i'' - i'$	[kJ.kg ⁻¹]
Vnitřní průměr trubky	d_1	Navržena	[m]
Vnější průměr trubky	d_2	Navržena	[m]

Tab. 10.1a

Značka	1. úsek	2. úsek	3. úsek	4. úsek
m_I	2404,10			
$t_{I,1}$	330,7	326,7	322,7	318,7
$t_{I,2}$	326,7	322,7	318,7	314,7
Δt_I	4	4	4	4
$t_{I,St}$	328,7	324,7	320,7	316,7
$i_{I,1}$	1520	1494	1468	1444
$i_{I,2}$	1494	1468	1444	1420
Q	61,26	61,26	56,54	56,54
t_{NV}	220			
i_{NV}	943,5			
t_{II}	286,3,9			
l_v	1501			
d_1	0,013			
d_2	0,016			

Tab. 10.1b

Značka	5. úsek	6. úsek	7. úsek	8. úsek
m_I	2404,1			
$t_{I,1}$	314,7	310,7	306,7	302,7
$t_{I,2}$	310,7	306,7	302,7	298,5
Δt_I	4	4	4	4,2
$t_{I,St}$	312,7	308,7	304,7	300,6
$i_{I,1}$	1420	1397	1374	1352
$i_{I,2}$	1397	1374	1352	1329
Q	54,19	54,19	51,83	54,19
t_{NV}	220			
i_{NV}	943,5			
t_{II}	286,3			
l_v	1501			
d_1	0,013			
d_2	0,016			

Tab. 10.1c

Název veličiny	Značka	Výpočet hodnoty	Jednotka
Entalpie syté vody (II. okruhu)	i'	Tabelována	[kJ.s ⁻¹]
Parní výkon úseku	G	$\frac{Q_{pg}}{l_v + 1,01 \cdot (i' - i_{NV})}$	[kg.s ⁻¹]
Hustota teplonositele při střední teplotě a tlaku 15,7 MPa	$\rho_{I,St}$	Tabelována	[kg.m ⁻³]
Celková plocha průřezu trubek	$S_{I,C}$	$n_{tr} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$	[kg.m ⁻³]
Střední rychlost proudění teplonositele	w_I	$\frac{m_I}{S_{I,C} \cdot \rho_{I,St}}$	[m ² .s ⁻¹]
Kinematická viskozita při střední teplotě	$\nu_{I,St}$	Tabelována	[m ² .s ⁻¹]
Reynoldsovo číslo	$Re_{I,St}$	$\frac{w_I \cdot d_1}{\nu_{I,St}}$	[1]
Součinitel tepelné vodivosti teplonositele při střední teplotě	$\lambda_{I,St}$	Tabelována	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Střední teplota stěny trubky	t_{trSt}	$\frac{t_{I,St} + t_{II}}{2}$	[°C]
Prandtlovo číslo při střední teplotě teplonositele	$Pr_{I,St}$	Tabelována	[1]
Prandtlovo číslo při střední teplotě stěny trubky	Pr_{trSt}	Tabelována	[1]
Nusseltovo číslo	$Nu_{I,St}$	$00,021 \cdot Re_{I,St}^{0,8} \cdot Pr_{I,St}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{I,St}}{Pr_{tr,St}} \right)^{0,25}$	[1]
Součinitel přestupu tepla na straně I. média	α_I	$Nu_{I,St} \cdot \frac{\lambda_{I,St}}{d_1}$	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
Tepelný odpor 1	R_1	$\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_2}{d_1}$	[m ² .K.W ⁻¹]

Tab. 10.2a

Značka	1. úsek	2. úsek	3. úsek	4. úsek
i'	1270			
G	33,46	33,46	30,89	30,89
$\rho_{l,St}$	656,61	668,33	679,26	689,54
$S_{l,C}$	0,952			
w_l	3,85	3,78	3,72	3,66
$v_{l,St}$	$1,171 \cdot 10^{-7}$	$1,178 \cdot 10^{-7}$	$1,183 \cdot 10^{-7}$	$1,189 \cdot 10^{-7}$
$Re_{l,St}$	427052,84	417444,56	408614,70	400394,58
$\lambda_{l,St}$	0,4761	0,4886	0,5002	0,5111
t_{trSt}	307,5	305,5	303,5	301,5
$Pr_{l,St}$	1,0720	1,0260	0,9895	0,9593
Pr_{trSt}	0,9076	0,8988	0,8908	0,8834
$Nu_{l,St}$	720,55	688,43	661,77	638,85
α_l	26388,72	25874,56	25462,94	25116,67
R_1	$4,664 \cdot 10^{-5}$	$4,757 \cdot 10^{-5}$	$4,834 \cdot 10^{-5}$	$4,900 \cdot 10^{-5}$
R_2	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$

Tab. 10.2b

Značka	5. úsek	6. úsek	7. úsek	8. úsek
i'	1270			
G	29,60	29,60	28,31	29,60
$\rho_{I,St}$	699,26	708,5	717,32	725,97
$S_{I,C}$	0,952			
w_I	3,61	3,57	3,52	3,48
$v_{I,St}$	$1,196 \cdot 10^{-7}$	$1,203 \cdot 10^{-7}$	$1,210 \cdot 10^{-7}$	$1,218 \cdot 10^{-7}$
$Re_{I,St}$	392639,45	385314,60	378301,62	371455,31
$\lambda_{I,St}$	0,5212	0,5308	0,5397	0,5484
t_{trSt}	299,5	297,5	295,5	293,45
$Pr_{I,St}$	0,9342	0,9132	0,8955	0,8803
Pr_{trSt}	0,8767	0,8705	0,8648	0,8594
$Nu_{I,St}$	618,87	601,33	585,69	571,41
α_I	24812,00	24552,85	24315,02	24104,53
R_1	$4,960 \cdot 10^{-5}$	$5,013 \cdot 10^{-5}$	$5,062 \cdot 10^{-5}$	$5,106 \cdot 10^{-5}$
R_2	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$	$8,883 \cdot 10^{-5}$

Tab. 10.2c

Název veličiny	Značka	Výpočet hodnoty	Jednotka
Tepelný odpor 3	R_3	$\frac{1}{\alpha_{II}}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
Celkový tepelný odpor	R_c	$R_1 + R_2 + R_3$	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
Navržený střední tepelný tok stěnou	$q_{St(t)}$	Odhad a následné upřesnění iterací	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
Součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média	α_{II}	$\frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (t_{II} - 100)} \cdot q_{St(t)}^{0,7}$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
Teplotní rozdíl mezi vstupujícím I. médiem a II. médiem	Δt_1	$t_{I,1} - t_{II}$	$[^\circ\text{C}]$
Teplotní rozdíl mezi vystupujícím I. médiem a II. médiem	Δt_2	$t_{I,2} - t_{II}$	$[^\circ\text{C}]$
Střední logaritmický teplotní spád	Δt_{ln}	$\frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$	$[^\circ\text{C}]$
Součinitel prostupu tepla	k	$\frac{1}{R_c}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$
Střední tepelný tok stěnou	q_{St}	$k \cdot \Delta t_{ln}$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
Potřebná teplosměnná plocha	S	$\frac{Q}{q_{St}}$	$[\text{m}^2]$
Celková délka teplosměnných trubek	L_{trC}	$\frac{S}{\pi \cdot d_2}$	$[\text{m}]$
Střední délka trubky	L_{tr}	$\frac{L_{trC}}{n_{tr}}$	$[\text{m}]$

Tab. 10.3a

Značka	1. úsek	2. úsek	3. úsek	4. úsek
R_3	$1,774 \cdot 10^{-5}$	$1,923 \cdot 10^{-5}$	$2,100 \cdot 10^{-5}$	$2,320 \cdot 10^{-5}$
R_C	$1,532 \cdot 10^{-4}$	$1,556 \cdot 10^{-4}$	$1,582 \cdot 10^{-4}$	$1,610 \cdot 10^{-4}$
$q_{St(t)}$	276540	246529	217242	188513
α_{II}	56370,00	52014,57	47607,80	43107,85
Δt_1	44,4	40,4	36,4	32,4
Δt_2	40,4	36,4	32,4	28,4
Δt_{In}	42,37	38,37	34,36	30,36
k	6527,01	5425,83	6322,30	6210,05
q_{St}	276539,70	246528,73	217241,76	188512,72
S	221,51	248,48	260,28	299,95
L_{trC}	4406,82	4943,28	5178,18	5967,33
L_{tr}	0,615	0,689	0,722	0,832

Tab. 10.3b

Značka	5. úsek	6. úsek	7. úsek	8. úsek
R_3	$2,599 \cdot 10^{-5}$	$2,970 \cdot 10^{-5}$	$3,492 \cdot 10^{-5}$	$4,320 \cdot 10^{-5}$
R_C	$1,644 \cdot 10^{-4}$	$1,687 \cdot 10^{-4}$	$1,744 \cdot 10^{-4}$	$1,831 \cdot 10^{-4}$
$q_{St(t)}$	160253	132462	105109	77538
α_{II}	38475,28	33672,96	28639,50	23146,09
Δt_1	28,4	24,4	20,4	16,4
Δt_2	24,4	20,4	16,4	12,2
Δt_{In}	26,35	22,34	18,33	14,20
k	6081,83	5929,28	5735,12	5461,70
q_{St}	160252,70	132462,26	105109,38	77537,60
S	338,14	409,09	493,13	698,87
L_{trC}	6727,16	8138,51	9810,49	13903,52
L_{tr}	0,938	1,135	1,368	1,939

Tab. 10.3c

11. Materiály PG

Volba vhodného typu oceli je velmi důležitá jak z hlediska konstituce, tak z hlediska požadované úrovně fyzikálně a mechanicko-metalurgických vlastností a také k zajištění spolehlivého a bezpečného provozu zařízení.

Stavba PG se neobejde bez vhodné oceli, na kterou je kladen důraz potřebné pevnostní úrovně za zvýšených i normálních teplot a příslušná úroveň lomové houževnatosti při zabezpečení dobré svařitelnosti.

Typy oceli 22 K, 20 K a 08Ch18N10T jsou osvědčené pro stavbu PG. V příloze č.2 je chemické složení těchto ocelí.

Dovolená napětí ocelí:

Součinitel bezpečnosti $k_k = 1,5$ je stanoven pro pevnostní výpočty jednotlivých částí PG. Z hodnoty součinitele bezpečnosti a z meze kluzu R_e je vypočteno dovolené napětí dle vztahu:

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k_k} \quad [MPa] \quad (11.1)$$

- ***Dovolené napětí pro materiál 22 K plech při teplotě 300 °C:***

$$\sigma_D = \frac{190}{1,5} = 126,67 \quad [MPa]$$

- ***Dovolené napětí pro materiál 22 K výkovek při teplotě 300 °C***

$$\sigma_D = \frac{186}{1,5} = 124 \quad [MPa]$$

- ***Dovolené napětí pro materiál 20 K při teplotě 300 °C***

$$\sigma_D = \frac{177}{1,5} = 118 \quad [MPa]$$

- ***Dovolené napětí pro materiál 08Ch18N10T při teplotě 350 °C:***

$$\sigma_D = \frac{177}{1,5} = 118 \quad [MPa]$$

Použití těchto typů ocelí pro jednotlivé elementy PG a jejich mechanické vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Materiál	Část konstrukce	R_m [MPa]	R_e [MPa]	σ_D [MPa]
22 K plech	<ul style="list-style-type: none"> • Střední a boční kroužky • Eliptické dna • Deskové víko průřezu PG • Eliptická část víka průřezu II. okruhu 	420	190	126,67
22 K výkovek	<ul style="list-style-type: none"> • Nátrubek průřezu PG • Příruba průřezu II. okruhu • Nátrubek napájecí a havarijní vody • Nátrubek průměru 1105 mm • Nátrubek páry na plášti 	420	186	124
20 K	<ul style="list-style-type: none"> • Kolektor páry • Nátrubky kolektoru páry • Dno kolektoru páry 	400	177	118
08Ch18N10T	<ul style="list-style-type: none"> • Trubky výměníku • Kolektor I. okruhu • Víko kolektoru I. okruhu • Přejímový kroužek 	360	177	118

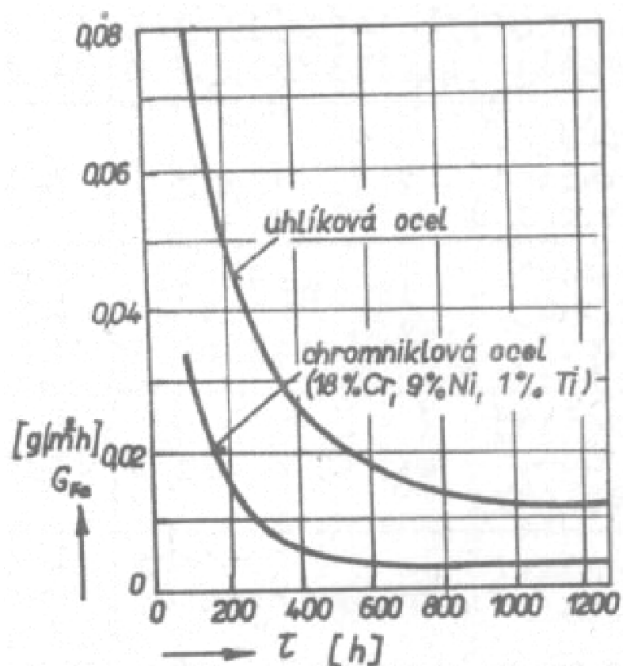
Tab. 11.1: Použité materiály pro PG

Materiál trubek:

Materiál 08Ch18N10T (ČSN 17 248) – nerezová austenitická niklchromová ocel, stabilizovaná titanem, byl zvolen pro teplotnosné trubky. Jde o strukturně stabilní materiál, který neuvolňuje korozní produkty, a tudíž se nezanášejí topné články.

Rychlost koroze niklchromované austenitické oceli a uhlíkové oceli, kde se uvažuje styk s kvalitní upravenou vodou pro primární okruhy je zobrazen na obr. 11.1.

Austenitické materiály mají nižší tepelnou vodivost než oceli uhlíkové, avšak jsou dražší. Nejpodstatnější nedostatek těchto materiálů je náchylnost ke korozi při zvýšené alkalitě a také za přítomnosti iontů chloru a kyslíku. Vysoce upravená voda s nízkým obsahem iontů Cl a nízkou alkalitou zajistí spolehlivou funkci teplosměnných trubek.



Obr. 11.1: Rychlost koroze uhlíkové a chromniklové oceli

12.Návrh a pevnostní výpočet základních rozměrů PG

Výpočet proveden v souladu s literaturou [4,7,9,10,15].

	V tělese	V trubkách
Tlak	7,05	15,7
Zeslabení koroze	$c_2 = 0,6$ [mm]	$c_2 = 0$ [mm]
Výpočtová teplota stěny	300	350

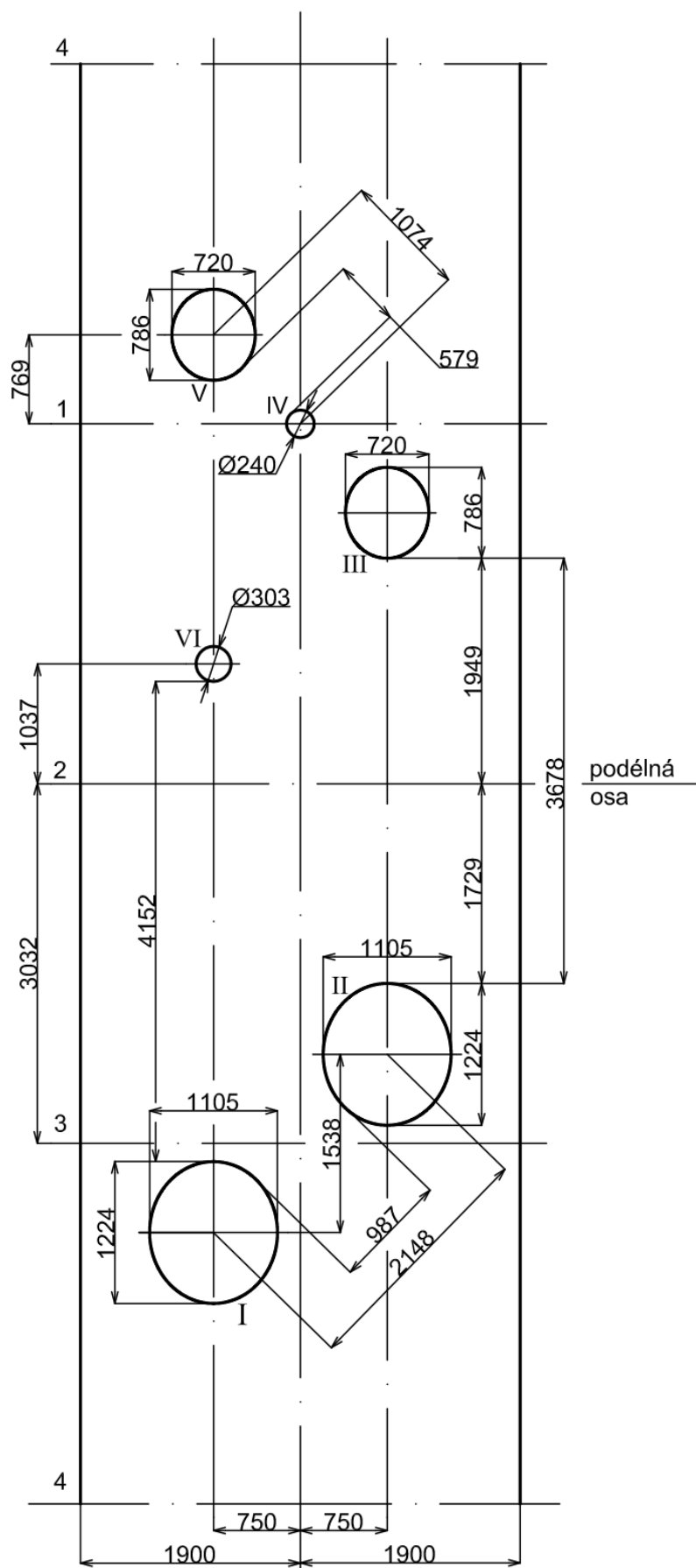
Tab. 12.1: Základní výpočtové parametry

Přídavek na korozi je vzat $c_2 = 0,6$ mm u oceli 22 K a 20 K. U oceli 08Ch18N10T je vzato $c_2 = 0$ mm. U trubky na kolektor páry a trubky na nátrubky kolektoru páry je brán přídavek $c_1 = 1,3$ mm.

12.1 Plášť PG

V návrhu pláště jsou stanoveny tloušťky těchto částí:

- Střední kroužek
- Boční kroužky
- Eliptická dna s průlezem PG
- Nátrubek průlezu II. okruhu
- Eliptické víko průlezu II. okruhu
- Nátrubek napájecí vody
- Nátrubek o průměru 1105 mm
- Nátrubek přívodu havarijní vody
- Nátrubek páry



Obr. 12.1: Rozvinutý plášť středního kroužku PG

12.1.1 Nominální tloušťka stěny středního kroužku parního generátoru

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 140 \text{ [mm]}$
Nominální vnitřní průměr středního kroužku	$D = 3720 \text{ [mm]}$
Střední průměr středního kroužku	$D_S = 3860 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$

Střední kroužek je oslaben otvory (viz. Obr. 12.1). Pevnostní koeficient středního kroužku je volen nejnižší z následujících.

Vzdálenost mezi sousedními okraji otvorů II a III je $L = 3678 \text{ mm}$.

- ***Podmínka platnosti osamělosti otvoru:***

$$2 \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)} < L \quad [\text{mm}] \quad (12.1)$$

$$2 \cdot \sqrt{3860 \cdot (140 - 0,6)} = 1467,08 < 3678 \quad [\text{mm}]$$

\Rightarrow vyhovuje

- ***Koeficient pevnosti:***

$$\varphi_1 = \frac{2}{2 + \frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}}} = \quad [1] \quad (12.2)$$

$$\varphi_1 = \frac{2}{2 + \frac{1105}{\sqrt{3860 \cdot (140 - 0,6)}}} = 0,57 \quad [1]$$

- ***Vzorec pro koeficient pevnosti osamělého otvoru:***

$$\frac{d}{\sqrt{D \cdot (s_N - c)}} > 1 \quad (12.3)$$

$$\varphi_1 = \frac{1105}{\sqrt{3860 \cdot (140 - 0,6)}} = 1,51 > 1$$

\Rightarrow vyhovuje

Vzdálenost mezi nejbližšími okraji otvorů I a VI je $L = 4152 \text{ mm}$.

- **Podmínka platnosti osamělosti otvoru:**

$$2 \cdot \sqrt{D_S \cdot (s_N - c)} < L \quad [mm] \quad (12.4)$$

$$2 \cdot \sqrt{3860 \cdot (140 - 0,6)} = 1467,08 < 4152 \quad [mm]$$

\Rightarrow vyhovuje

- **Koeficient pevnosti:**

$$\varphi_2 = \varphi_1 = 0,57$$

Koeficient pevnosti v šikmém směru:

a) Pro otvory I a II:

Vzdálenost mezi nejbližšími okraji otvorů je $L = 987$ mm.

- **Podmínka platnosti osamělosti otvoru:**

$$2 \cdot \sqrt{D_S \cdot (s_N - c)} < L \quad [mm] \quad (12.5)$$

$$2 \cdot \sqrt{3860 \cdot (140 - 0,6)} = 1467,08 < 987 \quad [mm]$$

\Rightarrow nevyhovuje

- **Koeficient pevnosti pro otvory I a II:**

Rozměry pro výpočet (viz. Obr. 12.1):

$$a = 1500 \text{ [mm]}$$

$$b = 1538 \text{ [mm]}$$

$$d = 1105 \text{ [mm]}$$

$$m = b/a = 1538/1500 = 1,0253 \text{ [1]}$$

$$\varphi_3 = \frac{1 - \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right)}} \quad [1] \quad (12.6)$$

$$\varphi_3 = \frac{1 - \frac{1105}{1500} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+1,0253^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{1,0253^2}{1+1,0253^2} \right)}} = 0,54 \quad [1]$$

b) Pro otvory III, IV a V:

Vzdálenost mezi nejbližšími okraji otvorů je $L = 578 \text{ mm}$.

- **Podmínka platnosti osamělosti otvoru:**

$$2 \cdot \sqrt{D_S \cdot (s_N - c)} < L \quad [\text{mm}] \quad (12.7)$$

$$2 \cdot \sqrt{3860 \cdot (140 - 0,6)} = 1467,08 > 578 \quad [\text{mm}]$$

\Rightarrow nevyhovuje

- **Koeficient pevnosti pro otvory III, IV a V:**

Rozměry (viz. Obr. 12.1):

$$d = 0,5 \cdot (d_3 + d_4) = 0,5 \cdot (720 + 240) = 480 \text{ [mm]}$$

$$d_3 = 720 \text{ [mm]}$$

$$d_4 = 240 \text{ [mm]}$$

$$a = 750 \text{ [mm]}$$

$$b = 769 \text{ [mm]}$$

$$m = b/a = 769/750 = 1,0263 \text{ [1]}$$

$$\varphi_4 = \frac{1 - \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right)}} \quad [1] \quad (12.8)$$

$$\varphi_3 = \frac{1 - \frac{480}{750} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+1,0263^2}}}{\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{1,0263^2}{1+1,0263^2} \right)}} = 0,62 \quad [1]$$

- **Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti pro nevyztužené otvory středního kroužku:**

$$\varphi_0 = \frac{p \cdot [D + (s_N - c)]}{2 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma_D} \quad [1] \quad (12.9)$$

$$\varphi_0 = \frac{7,05 \cdot [3720 + (140 - 0,6)]}{2 \cdot (140 - 0,6) \cdot 126,67} = 0,77 \quad [1]$$

Jelikož vypočtené hodnoty koeficientů pevnosti $\varphi_0 > \varphi$, je tedy nutné vyztužit otvory nátrubky.

Určení koeficientu pevnosti při vyztužení otvoru I a II nátrubky:

Zvolené rozměry vyztužujícího nátrubku:

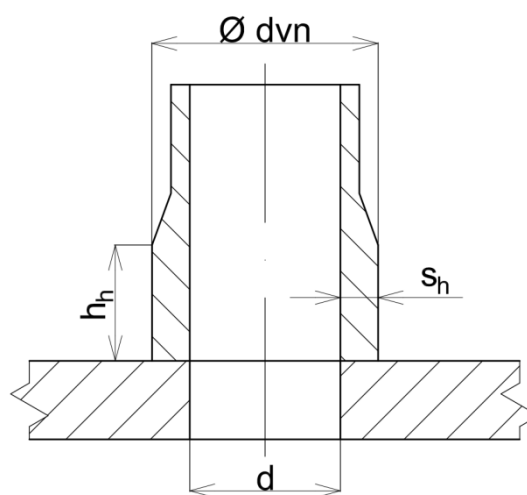
$$s_h = 120 \text{ [mm]}$$

$$c_h = 0,6 \text{ [mm]}$$

$$d_{vn} = 1345 \text{ [mm]}$$

$$h_h = 380 \text{ [mm]}$$

$$\varphi = \varphi_3 = 0,54 \text{ [1]}$$



Obr. 12.2: Nátrubek

- **Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:**

$$s_{oh} = \frac{p \cdot d_{vn}}{2 \cdot \sigma_D + p} \quad [\text{mm}] \quad (12.10)$$

$$s_{oh} = \frac{7,05 \cdot 1345}{2 \cdot 124 + 7,05} = 37,18 \quad [\text{mm}]$$

- **Maximální výška zesílené části nátrubku:**

$$h_{h,\max} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \quad [\text{mm}] \quad (12.11)$$

$$h_{h,\max} = \sqrt{(1345 - 120) \cdot (120 - 0,6)} = 382,45 \quad [\text{mm}]$$

- **Plocha průřezu zesilující části nátrubku:**

$$f_h = 2 \cdot h_h \cdot (s_h - s_{oh} - c_h) \quad [mm^2] \quad (12.12)$$

$$f_h = 2 \cdot 380 \cdot (120 - 37,18 - 0,6) = 62488,72 \quad [mm^2]$$

- **Plocha průřezu vyztužujícího nátrubku:**

Napětí materiálu nátrubku a středního kroužku není jednotné, proto pro plochu vyztužujícího průřezu platí:

$$f_h' = f_h \cdot \frac{\sigma_{Dn}}{\sigma_{Dk}} \quad [mm^2] \quad (12.13)$$

$$f_h' = 62488,72 \cdot \frac{124}{126,67} = 61171,56 \quad [mm^2]$$

- **Koeficient pevnosti při vyztužení otvorů I a II:**

$$\varphi' = \varphi + (1 - \varphi) \cdot \frac{f_h'}{(s_N - c) \cdot d} \quad [1] \quad (12.14)$$

$$\varphi' = 0,54 + (1 - 0,54) \cdot \frac{61171,56}{(140 - 0,6) \cdot 1105} = 0,72 \quad [1]$$

Určení koeficientu pevnosti při vyztužení otvorů III a V nátrubky:

Zvolené rozměry vyztužujícího nátrubku:

$$s_h = 100 \quad [mm]$$

$$c_h = 0,6 \quad [mm]$$

$$d_{vn} = 920 \quad [mm]$$

$$h_h = 280 \quad [mm]$$

$$\varphi = \varphi_4 = 0,62 \quad [1]$$

- **Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:**

$$s_{oh} = \frac{p \cdot d_{vn}}{2 \cdot \sigma_D + p} \quad [mm] \quad (12.15)$$

$$s_{oh} = \frac{7,05 \cdot 920}{2 \cdot 124 + 7,05} = 25,43 \quad [mm]$$

- **Maximální výška zesílené části nátrubku:**

$$h_{h,\max} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \quad [mm] \quad (12.16)$$

$$h_{h,\max} = \sqrt{(920 - 100) \cdot (100 - 0,6)} = 285,50 \quad [mm]$$

- **Plocha průřezu zesilující části nátrubku:**

$$f_h = 2 \cdot h_h \cdot (s_h - s_{oh} - c_h) \quad [mm^2] \quad (12.17)$$

$$f_h = 2 \cdot 280 \cdot (100 - 25,43 - 0,6) = 41423,03 \quad [mm^2]$$

- **Skutečná plocha vyztužujícího průřezu nátrubku:**

$$f_h' = f_h \cdot \frac{\sigma_{Dn}}{\sigma_{Dk}} \quad [mm^2] \quad (12.18)$$

$$f_h' = 41423,03 \cdot \frac{124}{126,67} = 40549,90 \quad [mm^2]$$

- **Koeficient pevnosti při vyztužení otvorů III a V:**

$$\varphi' = \varphi + (1 - \varphi) \cdot \frac{f_h'}{(s_N - c) \cdot d} \quad [1] \quad (12.19)$$

$$\varphi' = 0,62 + (1 - 0,62) \cdot \frac{40549,90}{(140 - 0,6) \cdot 720} = 0,77 \quad [1]$$

- **Minimální nominální tloušťka stěny středního kroužku:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi' \cdot \sigma_D - p} \quad [mm] \quad (12.20)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 3720}{2 \cdot 0,72 \cdot 126,67 - 7,05} = 139,73 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 140 \text{ mm} > s = 139,73$ vyhovuje

- **Podmínka pro platnost minimální tloušťky stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (12.21)$$

$$\frac{140 - 0,6}{3720} = 0,04 < 0,3$$

→ vyhovuje

12.1.2 Nominální tloušťka stěny bočního kroužku parního generátoru

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 110$ [mm]
Nominální vnitřní průměr bočního kroužku	$D = 3720$ [mm]
Střední průměr bočního kroužku	$D_S = 3830$ [mm]
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6$ [mm]
Průměr oslabujících otvorů	$d = 240$ [mm]

Boční kroužek je oslaben otvory pro nátrubkem přívodu havarijní vody a dvěma nátrubky kolektoru páry.

Vzdálenost sousedních okrajů nátrubků kolektoru páry je $L_1 = 1350$ mm a vzdálenost okrajů otvorů nátrubku přívodu kolektoru páry a havarijní vody je $L_2 = 1686$ mm. V potaz se tedy bere menší z určených vzdáleností.

- ***Podmínka platnosti osamělosti otvoru:***

$$2 \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)} < L \quad [m] \quad (12.22)$$

$$2 \cdot \sqrt{3830 \cdot (110 - 0,6)} = 1294,61 < 1350 \quad [m]$$

→ vyhovuje

- ***Koeficient pevnosti:***

$$\varphi = \frac{1,6}{1,4 + \frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}}} \quad [1] \quad (12.23)$$

$$\varphi = \frac{1,6}{1,4 + \frac{240}{\sqrt{3830 \cdot (110 - 0,6)}}} = 0,904 \quad [1]$$

- ***Vzorec pro koeficient pevnosti osamělého otvoru:***

$$\frac{d}{\sqrt{D \cdot (s_N - c)}} > 0,2 \quad (12.24)$$

$$\frac{240}{\sqrt{3830 \cdot (110 - 0,6)}} = 0,37 > 0,2$$

⇒ vyhovuje

- **Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti pro nevyztužené otvory bočního kroužku:**

$$\varphi_0 = \frac{p \cdot [D + (s_N - c)]}{2 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma_D} \quad [1] \quad (12.25)$$

$$\varphi_0 = \frac{7,05 \cdot [3720 + (110 - 0,6)]}{2 \cdot (110 - 0,6) \cdot 126,67} = 0,97 \quad [1]$$

Určení koeficientu pevnosti při vyztužení otvoru nátrubky:

Zvolené rozměry vyztužujícího nátrubku:

$$s_h = 70 \text{ [mm]}$$

$$c_h = 0,6 \text{ [mm]}$$

$$d_{vn} = 380 \text{ [mm]}$$

$$h_h = 145 \text{ [mm]}$$

- **Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:**

$$s_{oh} = \frac{p \cdot d_{vn}}{2 \cdot \sigma_D + p} \quad [mm] \quad (12.26)$$

$$s_{oh} = \frac{7,05 \cdot 380}{2 \cdot 124 + 7,05} = 10,50 \quad [mm]$$

- **Maximální výška zesílené části nátrubku:**

$$h_{h,max} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \quad [mm] \quad (12.27)$$

$$h_{h,max} = \sqrt{(380 - 70) \cdot (70 - 0,6)} = 146,68 \quad [mm]$$

- **Plocha průřezu zesilující části nátrubku:**

$$f_h = 2 \cdot h_h \cdot (s_h - s_{oh} - c_h) \quad [mm^2] \quad (12.28)$$

$$f_h = 2 \cdot 145 \cdot (70 - 10,50 - 0,6) = 17079,89 \quad [mm^2]$$

- **Plocha průřezu vyztužujícího nátrubku:**

$$f_h' = f_h \cdot \frac{\sigma_{Dn}}{\sigma_{Dk}} \quad [mm^2] \quad (12.29)$$

$$f_h' = 17079,89 \cdot \frac{124}{126,67} = 16719,87 \quad [mm^2]$$

- **Koeficient pevnosti pro výpočet nominální tloušťky stěny bočního kroužku:**

$$\varphi' = \varphi \cdot \left[1 + \frac{f_h'}{2 \cdot s_N \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} \right] \quad [1] \quad (12.30)$$

$$\varphi' = \left[1 + \frac{16719,87}{2 \cdot 70 \cdot \sqrt{3830 \cdot (110 - 0,6)}} \right] = 1,01 \quad [1]$$

- **Minimální nominální tloušťka stěny bočního kroužku:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi' \cdot \sigma_D - p} + c \quad [mm] \quad (12.31)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 3720}{2 \cdot 1,01 \cdot 126,67 - 7,05} + 0,6 = 106,04 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 110 \text{ mm} > s = 106,04 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (12.32)$$

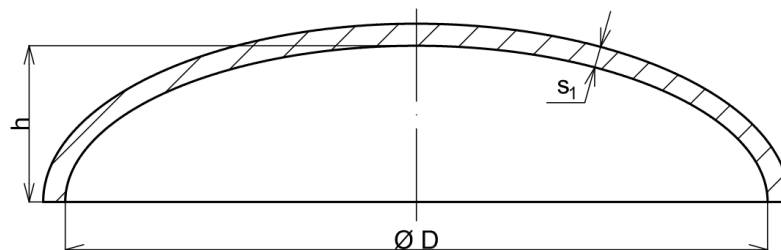
$$\frac{110 - 0,6}{3720} = 0,03 < 0,3$$

→ vyhovuje

12.1.3 Nominální tloušťka stěny eliptického dna parního generátoru

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 120 \text{ [mm]}$
Nominální vnitřní průměr eliptického dna	$D = 3720 \text{ [mm]}$
Střední průměr	$D_s = 3840 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Hloubka eliptického dna	$h = 850 \text{ [mm]}$



Obr. 12.3: Eliptické dno PG

Dno je oslabeno otvorem pro průlez do PG o průměru $d = 500 \text{ mm}$.

- **Koeficient pevnosti:**

$$\varphi_1 = \frac{1,6}{1,4 + \frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}}} \quad [1] \quad (12.33)$$

$$\varphi_1 = \frac{1,6}{1,4 + \frac{500}{\sqrt{3840 \cdot (120 - 0,6)}}} = 0,748 \quad [1]$$

- **Vzorec pro koeficient pevnosti osamělého otvoru:**

$$\frac{d}{\sqrt{D \cdot (s_N - c)}} > 0,2 \quad (12.34)$$

$$\varphi_1 = \frac{500}{\sqrt{3840 \cdot (120 - 0,6)}} = 0,74 > 0,2$$

→ vyhovuje

- **Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti pro nevzdušený otvor eliptického dna:**

$$\varphi_0 = \frac{p \cdot D}{4 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma_D} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} \quad [1] \quad (12.35)$$

$$\varphi_0 = \frac{7,05 \cdot 3720}{4 \cdot (120 - 0,6) \cdot 126,67} \cdot \frac{3720}{2 \cdot 850} = 0,949 \quad [1]$$

Určení koeficientu pevnosti eliptického dna při vyztužení otvoru:

Zvolené rozměry vyztužujícího nátrubku:

$$s_h = 115 \text{ [mm]}$$

$$c_h = 0,6 \text{ [mm]}$$

$$d_{vn} = 730 \text{ [mm]}$$

$$h_h = 265 \text{ [mm]}$$

- **Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:**

$$s_{oh} = \frac{p \cdot d_{vn}}{2 \cdot \sigma_D + p} \quad [mm] \quad (12.36)$$

$$s_{oh} = \frac{7,05 \cdot 730}{2 \cdot 124 + 7,05} = 20,18 \quad [mm]$$

- **Maximální výška zesílené části hrdla nátrubku:**

$$h_{h,\max} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \quad [mm] \quad (12.37)$$

$$h_{h,\max} = \sqrt{(730 - 115) \cdot (115 - 0,6)} = 265,25 \quad [mm]$$

- **Plocha průřezu zesilující části nátrubku:**

$$f_h = 2 \cdot h_h \cdot (s_h - s_{oh} - c_h) \quad [mm^2] \quad (12.38)$$

$$f_h = 2 \cdot 265 \cdot (115 - 20,18 - 0,6) = 49937,45 \quad [mm^2]$$

- **Skutečná plocha vyztužujícího průřezu nátrubku:**

$$f'_h = f_h \cdot \frac{\sigma_{Dn}}{\sigma_{Dk}} \quad [mm^2] \quad (12.39)$$

$$f'_h = 49937,45 \cdot \frac{124}{126,67} = 48884,85 \quad [mm^2]$$

- **Koeficient pevnosti pro výpočet nominální tloušťky stěny eliptického dna:**

$$\varphi' = \varphi \cdot \left[1 + \frac{f'_h}{2 \cdot s_N \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} \right] \quad [1] \quad (12.40)$$

$$\varphi' = 0,748 \cdot \left[1 + \frac{48884,85}{2 \cdot 120 \cdot \sqrt{3840 \cdot (120 - 0,6)}} \right] = 0,973 \quad [1]$$

- **Minimální nominální tloušťka stěny eliptického dna:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi' \cdot \sigma_D} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} + c \quad [mm] \quad (12.41)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 3720}{2 \cdot 0,973 \cdot 126,67} \cdot \frac{3720}{2 \cdot 850} + 0,6 = 116,37 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 120 \text{ mm} > s = 116,37 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,1 \quad (12.42)$$

$$\frac{120 - 0,6}{3720} = 0,03 < 0,1$$

→ *vyhovuje*

12.1.4 Nominální tloušťka stěny nátrubku průlezu parního generátoru

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 100 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 700 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- **Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku průlezu PG:**

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [\text{mm}] \quad (12.43)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 700}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,05} + 0,6 = 21,08 \quad [\text{mm}]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 100 \text{ mm} > s = 21,08 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (12.44)$$

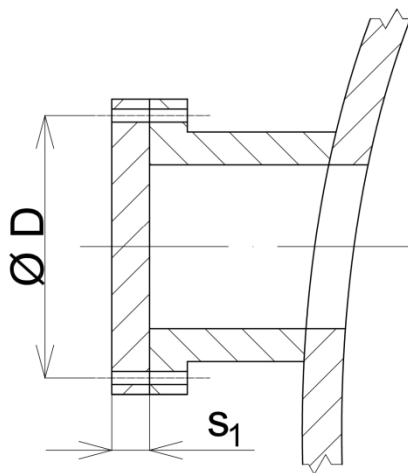
$$\frac{100 - 0,6}{700} = 0,14 < 0,2$$

→ *vyhovuje*

12.1.5 Nominální tloušťka deskového víka průřezu parního generátoru:

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka víka	$s_1 = 115 \text{ [mm]}$
Rozteč šroubů	$D = 800 \text{ [mm]}$
Koeficient tvaru víka	$K = 0,6 \text{ [1]}$
Průměr oslabujících otvorů	$K_0 = 1 \text{ [1]}$



Obr. 12.4: Nátrubek průřezu PG

- *Minimální nominální tloušťka stěny víka:*

$$s'_1 = \frac{K}{K_0} \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_D}} \quad [\text{mm}] \quad (12.45)$$
$$s'_1 = \frac{0,6}{1} \cdot 800 \cdot \sqrt{\frac{7,05}{126,67}} = 113,24 \quad [\text{mm}]$$

Zvolená tloušťka $s_1 = 115 \text{ mm} > s'_1 = 113,24 \text{ mm}$ vyhovuje.

12.1.6 Nominální tloušťka stěny nátrubku průřezu II. Okruhu

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 80 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D = 880 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- **Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku průřezu II. okruhu:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [mm] \quad (12.46)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 880}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,05} + 0,6 = 24,92 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 80 \text{ mm} > s = 24,92 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,2 \quad (12.47)$$

$$\frac{80 - 0,6}{880} = 0,09 < 0,2$$

→ vyhovuje

12.1.7 Nominální tloušťka stěny eliptického víka průřezu II. okruhu

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 36 \text{ [mm]}$
Nominální vnitřní průměr eliptického dna	$D = 720 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$
Hloubka eliptického dna	$h = 180 \text{ [mm]}$

- **Minimální nominální tloušťka stěny eliptického víka průřezu II. okruhu:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} + c \quad [mm] \quad (12.48)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 720}{2 \cdot 1 \cdot 126,67} \cdot \frac{720}{2 \cdot 180} + 0,6 = 20,036 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 36 \text{ mm} > s = 20,036 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínky platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{h}{D} > 0,2 \quad (12.49)$$

$$\frac{180}{720} = 0,25 > 0,2$$

→ vyhovuje

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,2 \quad (12.50)$$

$$\frac{36 - 0,6}{720} = 0,05 < 0,2$$

→ vyhovuje

12.1.8 Nominální tloušťka stěny nátrubku napájecí vody

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 19 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_V = 276 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- **Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku napájecí vody:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [\text{mm}] \quad (12.51)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 276}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,05} + 0,6 = 8,23 \quad [\text{mm}]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 19 \text{ mm} > s = 8,23 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (12.52)$$

$$\frac{19 - 0,6}{276} = 0,07 < 0,2$$

→ vyhovuje

12.1.9 Nominální tloušťka stěny nátrubku o průměru 1105 mm

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 85 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_V = 1275 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- **Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku o průměru 1105 mm:**

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [mm] \quad (12.53)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 1275}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,05} + 0,6 = 35,84 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 85 \text{ mm} > s = 36,12 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (12.54)$$

$$\frac{90 - 0,6}{1285} = 0,07 < 0,2$$

→ vyhovuje

12.1.10 Nominální tloušťka stěny nátrubku přívodu havarijní vody:

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 24,5 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 160 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- **Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku přívodu havarijní vody:**

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [mm] \quad (12.55)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 1285}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,05} + 0,6 = 5,02 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 24,5 \text{ mm} > s = 5,02 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (12.56)$$

$$\frac{24,5 - 0,6}{160} = 0,15 < 0,2$$

→ vyhovuje

12.1.11 Nominální tloušťka stěny nátrubku páry

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 60 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 360 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- *Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku páry:*

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [\text{mm}] \quad (12.57)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 360}{2 \cdot 1 \cdot 124 + 7,05} + 0,6 = 10,55 \quad [\text{mm}]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 60 \text{ mm} > s = 10,55 \text{ mm}$ vyhovuje.

- *Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:*

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (12.58)$$

$$\frac{60 - 0,6}{360} = 0,17 < 0,2$$

→ vyhovuje

12.2 Kolektor páry

Navrženy a pevnostně ověřeny tyto části kolektoru páry:

- Válcová část
- Nátrubek páry
- Kulové dno

12.2.1 Nominální tloušťka stěny válcové části kolektoru páry

Zvolené parametry:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 30$ [mm]
Nominální vnitřní průměr kolektoru páry	$D = 450$ [mm]
Střední průměr	$D_s = 420$ [mm]
Vnější průměr	$D_v = 390$ [mm]
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_1 + c_2 = 1,3 + 0,6 = 1,9$ [mm]
Průměr otvoru	$d = 240$ [mm]

Kolektor je oslaben otvory s různou roztečí pouze v podélném směru. Nejkratší vzdálenost mezi sousedními okraji otvorů nátrubku kolektoru je $L = 1359$ mm.

- **Podmínka platnosti osamělosti otvoru:**

$$2 \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)} < L \quad [mm] \quad (12.59)$$

$$2 \cdot \sqrt{420 \cdot (30 - 0,6)} = 217,24 < 1359 \quad [mm]$$

→ vyhovuje

- **Koeficient pevnosti:**

$$\varphi = \frac{2}{2 + \frac{d}{\sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}}} \quad [1] \quad (12.60)$$

$$\varphi = \frac{2}{2 + \frac{240}{\sqrt{420 \cdot (30 - 1,9)}}} = 0,48 \quad [1]$$

- **Vzorec pro koeficient pevnosti osamělého otvoru:**

$$\frac{d}{\sqrt{D \cdot (s_N - c)}} > 0,2 \quad (12.61)$$

$$\frac{240}{\sqrt{420 \cdot (30 - 1,9)}} = 2,21 > 0,2$$

→ vyhovuje

- **Minimální přípustná hodnota koeficientu pevnosti pro otvory kolektoru páry:**

$$\varphi_0 = \frac{p \cdot [D + (s_N - c)]}{2 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma_D} \quad [1] \quad (12.62)$$

$$\varphi_0 = \frac{7,05 \cdot [390 + (30 - 1,9)]}{2 \cdot (30 - 1,9) \cdot 118} = 0,44 \quad [1]$$

- **Zvolené rozměry vyztužujícího nátrubku:**

$$s_h = 20 \text{ [mm]}$$

$$c_h = c_2 + c_2 = 1,9 \text{ [mm]}$$

$$d_{vn} = 280 \text{ [mm]}$$

- **Minimální výpočtová tloušťka stěny vyztužujícího nátrubku:**

$$s_{oh} = \frac{p \cdot d_{vn}}{2 \cdot \sigma_D + p} \quad [mm] \quad (12.63)$$

$$s_{oh} = \frac{7,05 \cdot 280}{2 \cdot 118 + 7,05} = 8,12 \quad [mm]$$

- **Maximální výška zesílené části nátrubku:**

$$h_{h,max} = \sqrt{(d_{vn} - s_h) \cdot (s_h - c_h)} \quad [mm] \quad (12.64)$$

$$h_{h,max} = \sqrt{(280 - 20) \cdot (20 - 1,9)} = 68,60 \quad [mm]$$

- **Plocha průřezu zesilující části:**

$$f_h = 2 \cdot h_{h,max} (s_h - s_{oh} - c_h) \quad [mm^2] \quad (12.65)$$

$$f_h = 2 \cdot 68,60 \cdot (20 - 8,12 - 1,9) = 1365,02 \quad [mm^2]$$

- **Koeficient pevnosti pro výpočet nominální tloušťky stěny kolektoru páry:**

$$\varphi' = \varphi \cdot \left[1 + \frac{f_h}{2 \cdot s_N \cdot \sqrt{D_s \cdot (s_N - c)}} \right] \quad [1] \quad (12.66)$$

$$\varphi' = \left[1 + \frac{1365,02}{2 \cdot 20 \cdot \sqrt{420 \cdot (30 - 1,9)}} \right] = 0,575 \quad [1]$$

- **Minimální nominální tloušťka stěny kolektoru páry:**

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [mm] \quad (12.67)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 450}{2 \cdot 0,575 \cdot 118 + 7,05} + 1,9 = 24,126 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 30 \text{ mm} > s = 24,126 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (12.68)$$

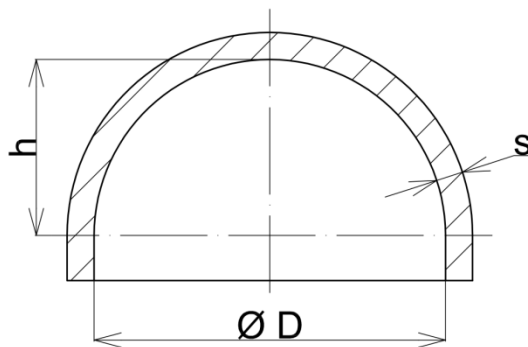
$$\frac{30 - 1,9}{450} = 0,06 < 0,2$$

→ vyhovuje

12.2.2 Nominální tloušťka stěny kulového dna kolektoru páry

Zvolené hodnoty:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 30 \text{ [mm]}$
Nominální vnitřní průměr	$D = 390 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 = 0,6 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$
Hloubka eliptického dna	$h = 195 \text{ [mm]}$



Obr.12.5: Kulové dno kolektoru páry

- **Minimální nominální tloušťka stěny kulového dna kolektoru páry:**

$$s = \frac{p \cdot D}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_D} \cdot \frac{D}{2 \cdot h} + c \quad [mm] \quad (12.69)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 390}{4 \cdot 1 \cdot 118} \cdot \frac{390}{2 \cdot 195} + 0,6 = 6,425 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 30 \text{ mm} > s = 6,425 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínky platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{h}{D} > 0,2 \quad (12.70)$$

$$\frac{195}{390} = 0,5 > 0,2$$

→ vyhovuje

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,1 \quad (12.71)$$

$$\frac{30 - 0,6}{390} = 0,08 < 0,1$$

→ vyhovuje

12.2.3 Nominální tloušťka stěny nátrubku kolektoru páry

Zvolené hodnoty:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 16,5 \text{ [mm]}$
Vnější průměr	$D_v = 273 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = c_2 + c_2 = 1,3 + 0,6 = 1,9 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- **Minimální nominální tloušťka stěny nátrubku kolektoru páry:**

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [mm] \quad (12.72)$$

$$s = \frac{7,05 \cdot 273}{2 \cdot 1 \cdot 118 + 7,05} + 1,9 = 9,819 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 16,5 \text{ mm} > s = 9,819 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka pro platnost vzorce pro tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (12.73)$$

$$\frac{16,5 - 1,9}{273} = 0,054 < 0,2$$

→ vyhovuje

12.3 Kolektor I.okruhu

Návrh základních rozměrů kolektoru je proveden u částí:

- Deskové víko průlezu I. Okruhu
- Horní válcová část
- Kuželová část
- Děrovaná válcová část
- Teplosměnné trubky
- Válcová část v místě svaru přechodového prstence

12.3.1 Nominální tloušťka stěny deskového víka průlezu I. Okruhu

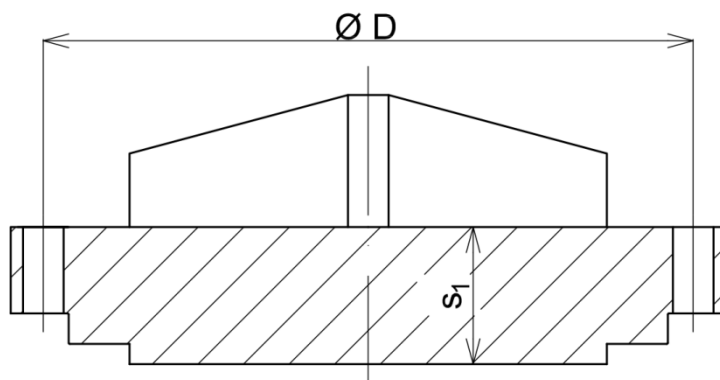
Zvolené hodnoty:

Nominální tloušťka víka $s_1 = 135 \text{ [mm]}$

Rozteč šroubů $D = 640 \text{ [mm]}$

Koeficient tvaru víka $K = 0,6 \text{ [1]}$

Průměr oslabujících otvorů $K_0 = 1 \text{ [1]}$



Obr. 12.6: Deskové víko průlezu I. okruhu

- **Minimální nominální tloušťka stěny víka:**

$$s'_1 = \frac{K}{K_0} \cdot D \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_D}} \quad [mm] \quad (12.74)$$

$$s'_1 = \frac{0,6}{1} \cdot 640 \cdot \sqrt{\frac{15,7}{118}} = 140,07 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_1 = 135 \text{ mm} < s'_1 = 140,07 \text{ mm}$ nevyhovuje. Víko je vyztuženo radiálními žebry, proto je volená tloušťka přijatelná.

12.3.2 Nominální tloušťka stěny horní válcové části kolektoru

Zvolené hodnoty:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 70 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr	$D = 550 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = 0 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- **Minimální tloušťka stěny válcové části kolektoru:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D - p} + c \quad [mm] \quad (12.75)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 550}{2 \cdot 1 \cdot 118 - 15,7} + 0 = 39,197 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 70 \text{ mm} > s = 39,197 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (12.76)$$

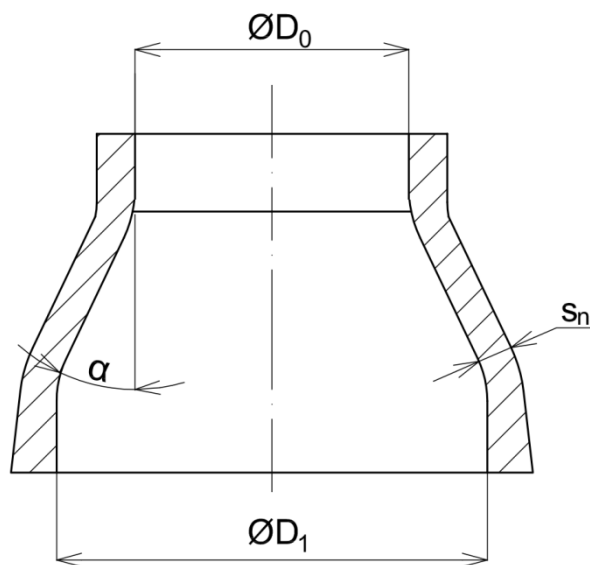
$$\frac{70 - 0}{550} = 0,127 < 0,3$$

→ vyhovuje

12.3.3 Nominální tloušťka kuželové části kolektoru

Zvolené hodnoty:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 70 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr 0	$D_0 = 550 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr 1	$D_1 = 866 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = 0 \text{ [mm]}$
Úhel sklonu	$\alpha = 23,5 \text{ [}^\circ\text{]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$



Obr. 12.7: Kuželová část kolektoru

- ***Minimální nominální tloušťka kuželové části kolektoru:***

$$s = \frac{p \cdot D_1}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D \cdot \cos \alpha - p} + c \quad [\text{mm}] \quad (12.77)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 866}{2 \cdot 1 \cdot 118 \cdot \cos 23,5 - 15,7} + 0 = 67,735 \quad [\text{mm}]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 70 \text{ mm} > s = 67,735 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínky platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$0,1 > \frac{s_N - c}{D_1} > 0,05 \quad (12.78)$$

$$0,1 > \frac{70 - 0}{866} > 0,05$$

$$0,1 > 0,081 > 0,05$$

→ *vyhovuje*

$$\frac{D_o}{D_1} \leq 1 - 2,8 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{s_N - c}{D_1}\right) \cdot \frac{s_N - c}{D_1} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\cos \alpha}}} \quad (12.79)$$

$$\frac{550}{866} \leq 1 - 2,8 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{70 - 0}{866}\right) \cdot \frac{70 - 0}{866} \cdot \frac{\sin 23,5}{\sqrt{\cos 23,5}}}$$

$$0,635 \leq 0,655$$

→ *vyhovuje*

12.3.4 Nominální tloušťka stěny děrované válcové části kolektoru

Zvolené hodnoty:

Nominální tloušťka stěny $s_N = 140$ [mm]

Vnitřní průměr $D = 800$ [mm]

Přídavek k tloušťce stěny $c = 0$ [mm]

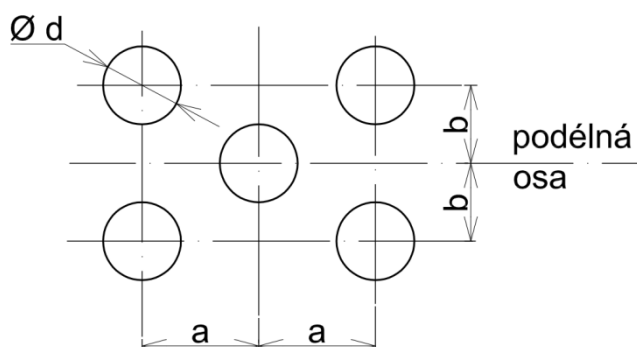
Válcová část je oslabena otvory pro teplosměnné trubky o rozměrech:

$$a = 24$$
 [mm]

$$b = 16$$
 [mm]

$$d = 16$$
 [mm]

$$m = b/a = 16/24 = 0,667$$
 [1]



Obr. 12.8: Otvory válcové části kolektoru pro teplosměnné trubky

- **Koeficient pevnosti pro šikmou řadu otvorů:**

$$\varphi = \frac{1 - \frac{d}{a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}}{\sqrt{1-0,75} \cdot \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right)^2} \quad [1] \quad (12.80)$$

$$\varphi = \frac{1 - \frac{16}{24} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+0,667^2}}}{\sqrt{1-0,75} \cdot \left(\frac{0,667^2}{1+0,667^2} \right)^2} = 0,46 \quad [1]$$

- **Minimální nominální tloušťka stěny děrované válcové části kolektoru:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D - p} + c \quad [mm] \quad (12.81)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 800}{2 \cdot 0,46 \cdot 118 - 15,7} + 0 = 134,572 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 140 \text{ mm} > s = 134,572 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (12.82)$$

$$\frac{140 - 0}{800} = 0,175 < 0,3$$

→ vyhovuje

12.3.5 Nominální tloušťka stěny kolektoru v místě svaru přechodového prstence

Zvolené hodnoty:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 90 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr	$D = 800 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = 0 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- **Minimální nominální tloušťka stěny válce:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D - p} + c \quad [mm] \quad (12.83)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 118 - 15,7} + 0 = 57,01 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 90 \text{ mm} > s = 57,01 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (12.84)$$

$$\frac{90 - 0}{800} = 0,1125 < 0,3$$

→ vyhovuje

12.3.6 Nominální tloušťka stěny teplosměnné trubky kolektoru

Zvolené hodnoty:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 1,5 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr	$D_v = 16 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = 0 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$

- **Minimální nominální tloušťka stěny trubky:**

$$s = \frac{p \cdot D_v}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D + p} + c \quad [mm] \quad (12.85)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 16}{2 \cdot 1 \cdot 118 + 15,7} + 0 = 0,998 \quad [mm]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 1,5 \text{ mm} > s = 0,998 \text{ mm}$ vyhovuje.

- **Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D_v} < 0,2 \quad (12.86)$$

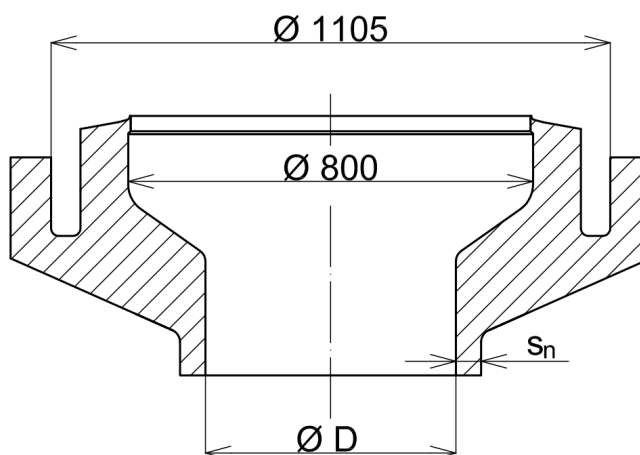
$$\frac{1,5 - 0}{16} = 0,094 < 0,2$$

→ vyhovuje

12.3.7 Nominální tloušťka stěny válcové části přechodového prstence kolektoru

Zvolené hodnoty:

Nominální tloušťka stěny	$s_N = 50 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr	$D = 495 \text{ [mm]}$
Přídavek k tloušťce stěny	$c = 0 \text{ [mm]}$
Koeficient pevnosti	$\varphi = 1 \text{ [1]}$



Obr. 12.9: Přechodový prstence kolektoru

- Minimální nominální tloušťka stěny válcové části přechodového prstence:**

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_D - p} + c \quad [\text{mm}] \quad (12.87)$$

$$s = \frac{15,7 \cdot 495}{2 \cdot 1 \cdot 118 - 15,7} + 0 = 35,277 \quad [\text{mm}]$$

Zvolená tloušťka $s_N = 50 \text{ mm} > s = 35,277 \text{ mm}$ vyhovuje.

- Podmínka platnosti vzorce pro minimální tloušťku stěny:**

$$\frac{s_N - c}{D} < 0,3 \quad (12.88)$$

$$\frac{50 - 0}{495} = 0,101 < 0,3$$

→ vyhovuje

12.4 Tabulka základních rozměrů PG

Název elementu	Tloušťka elementu [mm]
Střední kroužek pláště PG	140
Boční kroužek pláště PG	110
Eliptické dno pláště PG	120
Nátrubek průlezu PG	100
Deskové víko průlezu PG	115
Nátrubek průlezu II. okruhu	80
Eliptické víko průlezu II. okruhu	36
Nátrubek napájecí vody	19
Nátrubek o průměru 1150 mm	85
Nátrubek přívodu havarijní vody	24,5
Nátrubek páry na plášti PG	60
Válcová část kolektoru páry	30
Kulové dno kolektoru páry	30
Nátrubek kolektoru páry	16,5
Deskové víko kolektoru I. okruhu	135
Horní válcová část kolektoru I. okruhu	70
Kuželová část kolektoru I. okruhu	70
Děrovaná válcová část kolektoru I. okruhu	140
Válcová část kolektoru I. okruhu v místě svaru přechodového prstence	90
Trubky kolektoru I. okruhu	1,5
Válcová část přechodového prstence v místě svaru o průměru 520	50

13. Hydraulický výpočet I. okruhu PG

Výpočtem stanovíme hydraulické ztráty v primárním okruhu PG při proudění teplosmile. Parním generátorem při průtoku média probíhají hydrodynamické děje, a ty závisí na množství různých činitelů. Jde o množství, teplotu, hustotu a charakter proudění teplosmile, a dále o konstrukční a geometrickou charakteristiku protékanych kanálů.

Z fyzikálního hlediska se ztráty dělí na ztráty třením a místní ztráty. Proudění viskozitou kapaliny, jenž vyvolá tření kapaliny o obtékané plochy je ztráta třením vyšší, čím je potrubí delší. Při změně rychlosti, směru pohybu, nebo oběma současně dochází k nárůstu místních.

Prouděním kapaliny a následným překonáváním odporů dochází k nezvratné, nežádoucí přeměně mechanické energie

Znalost těchto tlakových ztrát je nutná pro výpočet potřebného příkonu motoru hlavních cirkulačních čerpadel.

Hydraulické ztráty primárního okruhu PG:

- Ztráta v příváděcím potrubí
- Ztráta ve vstupním kolektoru
- Ztráta na vstupu do střední řady teplosměnných trubek
- Ztráta při proudění v teplosměnných trubkách
- Ztráta změnou směru proudu o 180°
- Ztráta na výstupu z teplosměnných trubek
- Ztráta ve výstupním kolektoru
- Ztráta v odváděcím potrubí

13.1 Stanovení jednotlivých hydraulických ztrát

Výpočet proveden v souladu s literaturou [8,9,16].

13.1.1 Tlaková ztráta v příváděcím potrubí

Jedná se o ztrátu změnou velikosti průřezu potrubí.

Vypočtené hodnoty:

Vnitřní průměr příváděcího potrubí	$d_{pp} = 0,495 \text{ [m]}$
Vnitřní průměr příváděcího kolektoru	$d_{k1} = 0,8 \text{ [m]}$
Teplota teploty na vstupu do PG	$t_{I,1} = 330,7 \text{ [°C]}$
Hustota teploty při $t_{I,1} = 330,7 \text{ °C}$	$\rho_{I,1} = 650,4 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$
Průtok I. média	$m_I = 2404,10 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]}$

- ***Střední rychlost proudění teploty v příváděcím potrubí:***

$$w_{pp} = \frac{m_I}{\pi \cdot \frac{d_{pp}^2}{4} \cdot w_{pp}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (13.1)$$
$$w_{pp} = \frac{2404,10}{\pi \cdot \frac{0,495^2}{4}} = 19,21 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- ***Ztrátový součinitel na vstupu do příváděcího kolektoru:***

$$\zeta_{k1} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{d_{pp}^2}{d_{k1}^2} \right) \quad [1] \quad (13.2)$$
$$\zeta_{k1} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0,495^2}{0,8^2} \right) = 0,309 \quad [1]$$

- ***Tlaková ztráta v příváděcím potrubí:***

$$p_{z1} = \zeta_{k1} \cdot \frac{w_{pp}^2}{2} \cdot \rho_{I,1} \quad [Pa] \quad (13.3)$$
$$p_{z1} = 0,309 \cdot \frac{19,21^2}{2} \cdot 650,4 = 37021,56 \quad [Pa]$$

13.1.2 Tlaková ztráta ve vstupním kolektoru

Délka příváděcího kolektoru	$l_{k1} = 1,825 \text{ [m]}$
-----------------------------	------------------------------

- ***Střední rychlost proudění teplotonositele ve vstupním kolektoru:***

$$w_{k1} = \frac{m_I}{\pi \cdot \frac{d_{k1}^2}{4} \cdot \rho_{I,1}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (13.4)$$

$$w_{k1} = \frac{2404,10}{\pi \cdot \frac{0,8^2}{4} \cdot 650,4} = 7,354 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- ***Ztrátový součinitel při proudění ve vstupním kolektoru:***

$$X_1 = 0,8 - 0,015 \cdot \frac{l_{k1}}{d_{k1}} \quad [1] \quad (13.5)$$

$$X_1 = 0,8 - 0,015 \cdot \frac{1,825}{0,8} = 0,766 \quad [1]$$

- ***Tlaková ztráta ve vstupním kolektoru:***

$$p_{z2} = X_1 \cdot \frac{w_{k1}^2}{2} \cdot \rho_{I,1} \quad [1] \quad (13.6)$$

$$p_{z2} = 0,766 \cdot \frac{7,354^2}{2} \cdot 650,4 = 13466,68 \quad [1]$$

13.1.3 Tlaková ztráta na vstupu do střední řady teplosměnných trubek

Celková průtočná plocha teplosměnných trubek $S_{I,C} = 0,952 \text{ [m}^2\text{]}$

- ***Střední rychlost teplotonositele na vstupu do střední řady trubek:***

$$w_{I,1} = \frac{m_I}{S_{I,C} \cdot \rho_{I,1}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (13.7)$$

$$w_{I,1} = \frac{2404,10}{0,952 \cdot 650,4} = 3,88 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- ***Ztrátový součinitel na vstupu do střední řady trubek:***

Odečten: $\zeta_{tr1} = 0,5 \text{ [1]}$

- **Tlaková ztráta na vstupu do střední řady teplosměnných trubek:**

$$p_{z3} = \zeta_{tr1} \cdot \frac{w_{I,1}^2}{2} \cdot \rho_{I,1} \quad [Pa] \quad (13.8)$$

$$p_{z3} = 0,5 \cdot \frac{3,88^2}{2} \cdot 650,4 = 2452,95 \quad [Pa]$$

13.1.4 Tlaková ztráta při proudění v teplosměnných trubkách

Vypočtené hodnoty:

Střední teplota I. média	$t_{I,St} = 314,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Hustota I. média při jeho střední teplotě	$\rho_{I,St} = 694,7 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$
Střední rychlost I. média v trubkách	$w_I = 3,64 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$
Vnitřní průměr trubek	$d_I = 0,013 \text{ [m]}$
Střední délka trubek	$L_{tr} = 8,466 \text{ [m]}$
Reynoldsovo číslo	$Re_{I,St} = 397249,81 \text{ [1]}$

- **Součinitel tření při turbulentním prouděním dle Drewa:**

$$\lambda = 0,0056 + 0,05 \cdot (Re_{I,St})^{-0,32} \quad [1] \quad (13.9)$$

$$\lambda = 0,0056 + 0,05 \cdot (397249,81)^{-0,32} = 6,41 \cdot 10^{-3} \quad [1]$$

- **Tlaková ztráta při prouděním v teplosměnných trubkách:**

$$p_{z4} = \lambda \cdot \frac{L_{tr}}{d_I} \cdot \frac{w_I^2}{2} \cdot \rho_{I,St} \quad [Pa] \quad (13.10)$$

$$p_{z4} = 6,41 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{8,466}{0,013} \cdot \frac{3,64^2}{2} \cdot 694,7 = 19167,39 \quad [Pa]$$

13.1.5 Tlaková ztráta změnou směru proudu o 180°

- **Ztrátové koeficienty:**

$$A = f\left(\frac{R}{d_I}\right) = 0,03 \quad [1]$$

$$B = 1,4 \quad [1]$$

$$C = 1,0 \quad [1]$$

- **Ztrátový součinitel změnou směru proudu o 180°:**

$$\zeta_{zsp} = A \cdot B \cdot C \quad [1] \quad (13.11)$$

$$\zeta_{zsp} = 0,03 \cdot 1,4 \cdot 1,0 = 0,042 \quad [1]$$

- **Tlaková ztráta změnou směru proudu o 180°:**

$$p_{z5} = \zeta_{zsp} \cdot \frac{w_I^2}{2} \cdot \rho_{I,St} \quad [Pa] \quad (13.12)$$

$$p_{z5} = 0,042 \cdot \frac{3,64^2}{2} \cdot 694,7 = 192,91 \quad [Pa]$$

13.1.6 Tlaková ztráta na výstupu z teplosměnných trubek

Vypočtené hodnoty:

Teplota teplonositele na vstupu do PG $t_{I,2} = 298,5 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$

Hustota teplonositele při $t_{I,2} = 298,5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ $\rho_{I,2} = 730 \text{ } [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

- **Střední rychlost teplonositele na výstupu ze střední řady trubek:**

$$w_{I,2} = \frac{\dot{m}_I}{S_{I,C} \cdot \rho_{I,2}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (13.13)$$

$$w_{I,2} = \frac{2404,10}{0,952 \cdot 730} = 3,46 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- **Ztrátový součinitel na výstupu ze střední řady trubek:**

Odečten: $\zeta_{tr1} = 1 \text{ } [1]$

- **Tlaková ztráta na výstupu z teplosměnných trubek:**

$$p_{z6} = \zeta_{tr2} \cdot \frac{w_{I,2}^2}{2} \cdot \rho_{I,2} \quad [Pa] \quad (13.14)$$

$$p_{z6} = 1 \cdot \frac{3,46^2}{2} \cdot 730 = 4370,96 \quad [Pa]$$

13.1.7 Tlaková ztráta ve výstupním kolektoru

Vypočtené hodnoty:

Vnitřní průměr odváděcího kolektoru $d_{k2} = 0,8 \text{ [m]}$

Výpočtová délka odváděcího kolektoru $l_{k2} = 1,825 \text{ [m]}$

- *Střední rychlost proudění teplotonositele ve výstupním kolektoru:*

$$w_{k2} = \frac{\dot{m}_I}{\pi \cdot \frac{d_{k2}^2}{4} \cdot \rho_{I,2}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (13.15)$$

$$w_{k2} = \frac{2404,10}{\pi \cdot \frac{0,8^2}{4} \cdot 730} = 6,55 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- *Ztrátový součinitel při proudění ve výstupním kolektoru:*

$$X_2 = 2,5 - 0,025 \cdot \frac{l_{k2}}{d_{k2}} \quad [1] \quad (13.16)$$

$$X_2 = 2,5 - 0,025 \cdot \frac{1,825}{0,8} = 2,557 \quad [1]$$

- *Tlaková ztráta ve výstupním kolektoru:*

$$p_{z7} = X_2 \cdot \frac{w_{k,2}^2}{2} \cdot \rho_{I,2} \quad [Pa] \quad (13.17)$$

$$p_{z7} = 2,557 \cdot \frac{6,55^2}{2} \cdot 730 = 40063,57 \quad [Pa]$$

13.1.8 Tlaková ztráta v odváděcím potrubí

Jedná se o místní ztrátu změnou velikosti průřezu potrubí.

Vnitřní průměr odváděcího potrubí $d_{op} = 0,495 \text{ [m]}$

- ***Střední rychlost proudění teplotonositele v odváděcím potrubí:***

$$w_{op} = \frac{\dot{m}_I}{\pi \cdot \frac{d_{op}^2}{4} \cdot \rho_{I,2}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (13.18)$$

$$w_{op} = \frac{2404,10}{\pi \cdot \frac{0,495^2}{4} \cdot 730} = 17,11 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- ***Ztrátový součinitel na výstupu z odváděcího kolektoru:***

$$\zeta_{k2} = \left(1 - \frac{d_{op}^2}{d_{k2}^2}\right)^2 \quad [1] \quad (13.19)$$

$$\zeta_{k2} = \left(1 - \frac{0,495^2}{0,8^2}\right)^2 = 0,381 \quad [1]$$

- ***Tlaková ztráta v odváděcím potrubí:***

$$p_{z8} = \zeta_{k2} \cdot \frac{w_{op}^2}{2} \cdot \rho_{I,2} \quad [Pa] \quad (13.20)$$

$$p_{z8} = 0,381 \cdot \frac{17,11^2}{2} \cdot 730 = 40712,90 \quad [Pa]$$

13.2 Celková tlaková ztráta primárního okruhu PG

$$p_{zC} = p_{z1} + p_{z2} + p_{z3} + p_{z4} + p_{z5} + p_{z6} + p_{z7} + p_{z8} \quad [Pa] \quad (13.21)$$

$$p_{zC} = 37021,56 + 13466,68 + 2452,95 + 19167,39 + 192,91 + 4370,96 + 40063,57 + 40712,90 = 157448,91 \quad [Pa]$$

Z výpočtů vyplývá, že na celkové tlakové ztrátě se nejvíce podílí proudění teplotonositele v teplosměnných trubkách. Tento výpočet byl zjednodušeně proveden pouze pro střední řadu teplosměnných trubek.

14. Návrh separace páry

Pro PG jaderných centrál je nutné ve vyrobené páře snižovat vlhkost. Separátory slouží k odstranění kapek vody rozptýlených v páře. Tato zařízení mohou tvořit děrované stropní štíty, cyklóny nebo žaluziové odlučovačky.

Zajištění správné funkce odlučovačů je podmíněno rozvodem proudu mokré páry přes zachytné plochy, aby jejich účinek odpovídal funkčním a výpočtovým předpokladům.

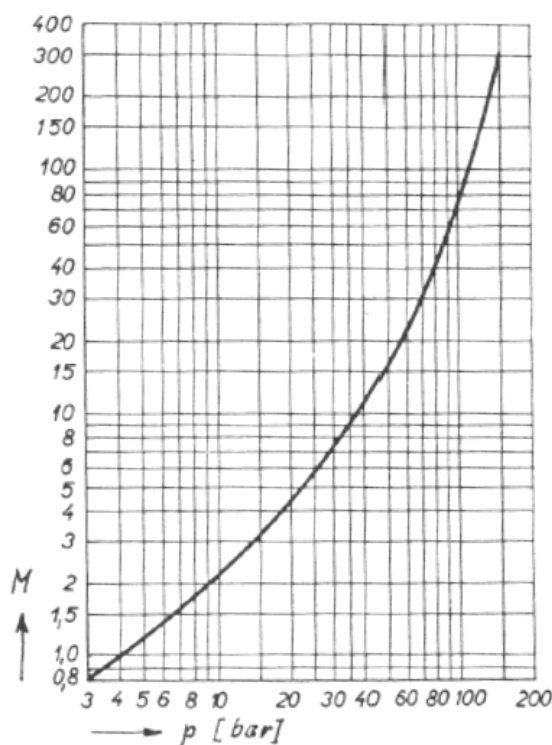
Hodnotu, při které dochází k opětovnému strhávání kapek do hlavního proudu, nemá rychlost páry nikde překročit. Účinnost separátoru se definuje jako poměr oddělené vlhkosti ku obsahu vlhkosti vstupní páry.

Vlhkost výstupní páry ze separačního zařízení $(1-x)$ závisí na počáteční vlhkosti a samozřejmě také na funkci vlastního separátoru. Vstupní vlhkost je závislá na zatížení hladiny (rychlosti páry), výšce parního prostoru, ve které dochází gravitačním účinkem

k sedimentaci a na vlastnostech vody a páry na mezní křivce (povrchové napětí, hustota, viskozita), závisících tedy na tlaku. Lze ji určit z empirického vztahu

$$(1-x) = 0,211 \cdot \frac{(w_h)^{2,76}}{h_p} \cdot M \quad [\%], \text{ kde „M“ je}$$

pomocná veličina závislá na vlastnostech páry (viz. Obr. 14.1), „ w_h “ je rychlost páry vztažená na hladinu a „ h_p “ představuje výšku parního prostoru. Z tohoto vztahu je patrné, že s rostoucí výškou parního prostoru a s klesající rychlostí páry vztažené na plochu hladiny (zatížení hladiny), vlhkost páry klesá.



Obr. 14.1: Určení pomocné veličiny „M“

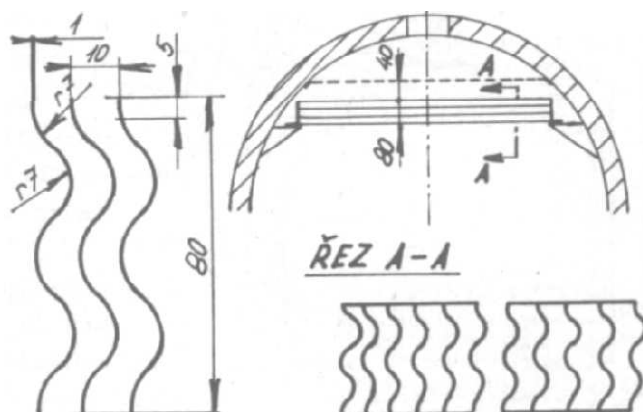
Rovnoměrné zatížení hladiny je v celém procesu velmi důležitým prvkem, proto je nutné na něj brát při konstrukci zřetel. Lze jej dostatečně zlepšit vložení děrovaných plechů pod hladinu. Zmiňovaný plech se umístí 50 až 75 mm pod hladinu a po straně zůstane mezera od stěny větší než 150 mm zajišťující odtok vody. Otvory jsou přibližně

veliké ~ 10 mm. Pod plechem vzniká parní polštář, díky svislému rámu na okraji o výšce 80 až 100 mm.

14.1 Žaluziový separátor

Volba vhodného separačního zařízení závisí na samotném typu PG, pro který je separátor užit. Pro náš případ, tedy pro korpusový horizontální typ, se jako separační

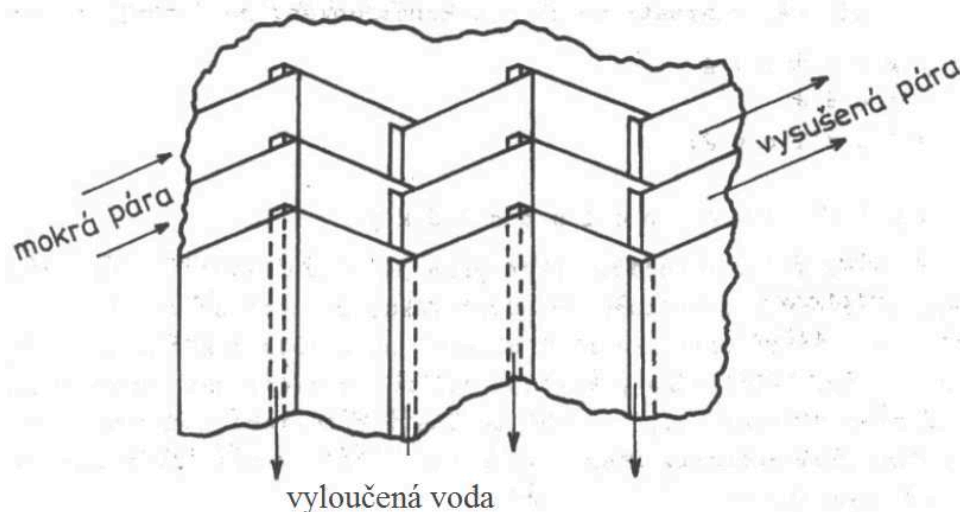
zařízení používá svislý žaluziový separátor, a to jako jediný aktivní separační prvek. Toto jednostupňové zařízení je možné použít z důvodu velmi nízkého měrného zatížení parního prostoru PG.



Obr. 14.2: Separátor z vlnitých plechů

Žaluziový separátor je tvořen vertikálně orientovanými plechy s maximálním sklonem 30°. Plechy těchto separátorů tvoří buď kruhové oblouky (obr. 14.2) nebo hrany (obr. 14.3). Odseparovaná vlhkost vytváří vodní film, který stéká zpět.

Účinnost žaluziových separátorů nezávisí téměř vůbec na přítoku páry, obsahu vlhkosti v páře a disperzi vodních kapek. Závisí v podstatě jen na konstrukci samotného zařízení. Hraničním parametrem je kritická rychlost přítoku páry, při níž začne docházet k odtrhávání vodního filmu na žaluziích a obsah vody v páře začne narůstat.



Obr. 14.3: Princip žaluziového separátoru

Pracovní rychlost žaluziového separátoru se volí 0,2 až 0,7 z kritické rychlosti. Požadavkem je minimální vstupní vlhkost vyrobené páry pro správnou činnost separátoru. Dále malá tlaková ztráta páry, jenž prochází soustavou žaluzií a snadný odvod odloučené vody, kde nedochází k zahlcení prostoru mezi žaluziemi. Požadavky technologického charakteru, například možnost opravy, demontování a umístění, jsou důležité aspekty pro návrh vyžadujícího separačního zařízení.

14.2 Výpočet žaluziové separace

Výpočet proveden v souladu s literaturou [5,10].

- **Parní zatížení hladiny:**

Plocha hladiny (při výšce 500 mm
nad horizontální osou PG)

$$S_h = 34,93 \text{ [m}^2\text{]}$$

Hustota syté vody

$$\rho' = 741,84 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$

Hustota syté páry

$$\rho'' = 38,82 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$$

Parní výkon

$$G = 245,80 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]}$$

$$w_h = \frac{G}{S_h \cdot \rho''} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (14.1)$$

$$w_h = \frac{245,80}{34,93 \cdot 38,82} = 0,181 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

- **Povrchové napětí vody:**

$$\sigma = 0,00714 \cdot g \cdot \left(\frac{\rho' - \rho''}{1000} \right) \quad [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (14.2)$$

$$\sigma = 0,00714 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{741,84 - 38,82}{1000} \right) = 0,017 \quad [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$$

- **Vstupní vlhkost páry:**

Výška parního potrubí	$h_p = 1,1 \text{ [m]}$
Pomocný parametr (odečteno – obr. 14.1)	$M = 30 \text{ [1]}$

$$(1-x) = 0,211 \cdot \frac{w_h^{2,76}}{h_p^{2,3}} \cdot M \quad [1] \quad (14.3)$$

$$(1-x) = 0,211 \cdot \frac{0,181^{2,76}}{1,1^{2,3}} \cdot 30 = 4,542 \cdot 10^{-2} \quad [1]$$

- **Kutateladzeho kritérium:**

Zvolené rozměry:

Výška žaluzie	$h_z = 0,94 \text{ [m]}$
Rozteč žaluzií	$t_z = 0,01 \text{ [m]}$
Rozvinutá šířka žaluzie	$b_z = 0,16 \text{ [m]}$
Polovina úhlu zakřivení toku páry	$\alpha_{zt} = 48 \text{ [}^\circ\text{]}$
Parametr charakterizující max. zatížení	$C = 2,2 \text{ [1]}$
Vstupní vlhkost páry	$(1-x) = 4,542 \cdot 10^{-2} \text{ [1]}$

$$Ku = C - 1,69 \cdot \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h_z \cdot t_z}{b_z} \right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_{zt}} \quad [1] \quad (14.4)$$

$$Ku = -1,69 \cdot \left(\frac{4,542 \cdot 10^{-2}}{0,955} \right)^{0,56} \cdot \left(\frac{0,94 \cdot 0,01}{0,16} \right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos 48} = 1,974 \quad [1]$$

- **Kritická rychlost:**

$$w_{kr} = \frac{Ku \cdot \sqrt[4]{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}}{\sqrt{\rho''}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (14.5)$$

$$w_{kr} = \frac{1,974 \cdot \sqrt[4]{9,81 \cdot 0,017 \cdot (741,84 - 38,82)}}{\sqrt{38,82}} = 1,044 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- **Doporučená vstupní rychlost páry do separátoru:**

$$w_{sep(dop)} = (0,2 \sim 0,7) \cdot w_{kr} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (14.6)$$

$$w_{sep(dop)} = (0,2 \sim 0,7) \cdot 1,044 = 0,208 \sim 0,731 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

- **Průtočná plocha separátoru:**

$$S_{sep(dop)} = \frac{G}{w_{sep(dop)} \cdot \rho''} \quad [m^2] \quad (14.7)$$

$$S_{sep(dop)} = \frac{245,80}{(0,208 \sim 0,731) \cdot 38,82} = 8,65 \sim 30,27 \quad [m^2]$$

Průtočná plocha žaluziového separátoru byla navržena $S_{sep} = 17 \text{ m}^2$ v souladu s geometrií tělesa PG a je tedy rozdělen na dva totožné díly o rozměrech $2 \times 8,5 \text{ m}^2$. Separátor je umístěn do horní části PG před vstupem do kolektoru páry.

- **Pracovní vstupní rychlost páry do separátoru:**

$$w_{sep} = \frac{G}{S_{sep(dop)} \cdot \rho''} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (14.8)$$

$$w_{sep} = \frac{245,80}{17 \cdot 38,82} = 0,372 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Shrnutí základních rozměrů žaluziového separátoru:

Průtočná plocha separátoru	$S_{sep} = 17 [m^2]$
Výška žaluzie	$h_z = 0,94 [m]$
Délka separátoru	$l_{sep} = 8,5 [m]$
Rozteč žaluzií	$t_z = 0,01 [m]$
Rozvinutá šířka žaluzie	$b_z = 0,16 [m]$

14.3 Hydraulický výpočet žaluziového separátoru:

Koeficient odporu žaluzie	$\zeta_z = 9,72 [1]$
Hustota vstupující mokré páry ($x = 0,955$)	$\rho_{mp} = 38,48 [kg \cdot m^{-3}]$

- **Tlaková ztráta v separátoru:**

$$p_{Zsep} = \zeta_z \cdot \frac{w_{sep}^2}{2} \cdot \rho_{mp} \quad [Pa] \quad (14.9)$$

$$p_{Zsep} = 9,72 \cdot \frac{0,372^2}{2} \cdot 38,48 = 25,86 \quad [Pa]$$

Tlak páry za separátorem je nezměněný, neboť tlaková ztráta je téměř zanedbatelná.

15. Závěr a shrnutí dosažených výsledků

Cílem diplomové práce byl konstrukční návrh horizontálního parního generátoru o tepelném výkonu 450 MW pro jadernou elektrárnu VVER 640 MWe. Stavba parogenerátoru musí bezpochyby vyhovovat daným požadavkům, kritériím a důraz se také klade na vysokou spolehlivost a bezpečnost.

Zpracování se také zaměřuje na podrobnější rozbor III+ a IV generace jaderných elektráren, jenž vysvětluje hlavní důraz na zvyšování bezpečnosti, ekonomičnosti a ochranu proti zneužití jaderných materiálů v daném oboru energetiky.

Pochopení problematiky a následků havárií jaderných elektráren z minulosti dalo nový směr především pro zvyšování bezpečnosti (například použití dvojitého betonového kontejmentu, nebo sofistikovaných řídicích systémů) a vzniku projektu GIF, nebo Mezinárodní agentury pro atomovou energii, která dohlíží a stanovuje pravidla pro mírové využití jaderné energie.

Výpočtová část vychází ze zadaných hodnot parního generátoru, který vyrábí sytou páru o teplotě 298,5 °C, tlaku 15,7 MPa a je umístěn ve čtyřsmýčkovém uspořádání primárního okruhu bloku jaderné elektrárny. Vypočtenými hodnotami pro požadované energetické parametry generátoru je celková teplosměnná plocha 3051,28 m², která je tvořena ze 7170 trubek tvaru „U“ o střední délce 8,47 m. Primární médium o celkovém hmotnostním toku 2404,1 kg.s⁻¹ sníží svou teplotu o 32,2 °C, přičemž střední logaritmický teplotní spád mezi ním a sytou parou je 24,93 °C. Parní výkon je tedy 245,80 kg.s⁻¹.

Výpočty se došlo k závěru, že tlaková nádoba parního generátoru musí mít dva střední kroužky o tloušťce stěny 140 mm a čtyři boční kroužky s tloušťkou stěny 110 mm. Nádobu uzavírají dvě eliptická dna o tloušťce 120 mm, přičemž v jednom z nich je otvor pro průlez do parního generátoru o průměru 500 mm. V horní části se nachází pět otvorů o průměru 240 mm pro odvod páry z parního generátoru do kolektoru páry o průměru 450 mm a jeho tloušťce pláště 30 mm.

Vstupní a výstupní kolektory jsou tvořeny horní částí kolektoru uzavřeného víkem, střední děrovanou částí, jenž obsahuje díry pro teplosměnné trubky o rozměrech 16 x 1,5 mm a přechodového prstence, jenž je přivařen k nátrubku a ten je přivařen ke střednímu kroužku parního generátoru. Pro výrobu segmentů parního generátoru byly použity osvědčené typy oceli 22 K, 20 K a 08Ch18N10T.

Hydraulické ztráty byly vypočteny od vstupu do přiváděcího kolektoru až po jeho odvod z výstupního kolektoru a celková ztráta činí 157,45 kPa. Celková ztráta je potřebná pro výpočet příkonu motoru cirkulačního čerpadla.

Jako jemný odlučovač vlhkosti u parního generátoru je použit žaluziový separátor. Separátor vlhkosti je dvoudílný, jehož části jsou umístěny vedle sebe s malým sklonem a je umístěn v horní části parního generátoru. Obě části separátoru mají průtočnou plochu celkem 17 m². Žaluzie je vysoká 0,94 m a rozteče mezi nimi jsou široké 0,02 m.

Pára v žaluziích by se měla pohybovat rychlostí 0,204 ~ 0,715 m/s a nikdy by neměla překročit kritickou rychlost 1,022 m/s. Pro tento případ je pracovní rychlost páry v žaluziích 0,372 m/s.

16. Seznam použité literatury

a) knihy a publikace

- [1] *A Technology Road map for Generation IV Nuclear Energy Systems*. U.S. DOE a GIF, prosinec 2002 (anglicky)
- [2] Blažková I.: *Jaderné elektrárny, jejich perspektivy a nové koncepce*. 2003
- [3] *Budování kultury bezpečnosti při jaderných činnostech*. MAAE, Vídeň 1998
- [4] Černoch, S.: *Strojně technická příručka*, SNTL Praha 1968
- [5] Černý, V., Janeba, B., Karták, J., Jirouš, F., Marvan, B.: *Základy konstruování kotlů a parogenerátorů jaderných elektráren*, ČVUT Praha, 1974
- [6] Dubšek, F.: *Jaderná energetika*, VUT Brno, 1994
- [7] Hejzar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren*, ČVUT Praha 1994
- [8] Janalík, J., Šťáva, P.: *Mechanika tekutin*, VŠB-TU Ostrava, FS, 2004
- [9] Janeba, B.: *Kotelní agregáty a parogenerátory*, ČVUT Praha 1975
- [10] Janeba, B., Karták, J.: *Tepelné výpočty kotlů a parních generátorů*, ČVUT Praha, 1982
- [11] Kadlec, Z.: *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*, SPBI, 2009
- [12] Kadlec, Z., Blahož, V.: *Základy Sdílení tepla*, SPBI, 2000
- [13] Kostka T.: *Havárie v jaderné elektrárně Černobyl. 5/2006-2007*
- [14] Leinveber, J., Vávra, P.: *Strojnické tabulky*, ALBRA – pedagogické nakladatelství, Úvaly, 2003
- [15] Mazanec, K.: *Základní fyzikálně-metalurgické charakteristiky material pro jadernou energetiku*, VŠB-TU Ostrava 1979
- [16] Noskievič, J.: *Hydromechanika*, VŠB-TU Ostrava 1985
- [17] Rédr, M., Příhoda, M.: *Základy tepelné techniky*. Praha. SNTL, 1991
- [18] Ražnjević, J.: *Termodynamické tabulky*, Alfa Bratislava, 1984
- [19] *The future of nuclear energy*. Europhysics News 32/5 (2001) 185. New York, 1991
- [20] Vesecký R.: *JE s reaktory III. a IV. generace*. Praha 2005
- [21] Zeman J. a kol.: *Vývoj požadavků na bezpečnost nových jaderných reaktorů*. FJFI ČVUT Praha

b) internetové zdroje

- [26] <<http://www.areva.com/>> AREVA (anglicky)
- [27] <<http://www.cez.cz/>> ČEZ, a.s. (česky)
- [28] <<http://www.csvts.cz/cns/>>Česká nukleární společnost (česky)
- [29] <<http://www.euronuclear.org/>>*The European Nuclear Society* (anglicky)
- [30] <<http://www.iaea.org/>>*International Atomic Energy Agency* (anglicky)
- [31] <<http://www.jaderna-energie.cz/>>*Výroba jaderné energie* (česky)
- [32] <<http://www.nei.org/>>*Nuclear Energy Institute* (anglicky)
- [33] <<http://www.ne.doe.gov/>>*Office of Nuclear Energy, Science & Technology* (anglicky)
- [34] <<http://www.nrc.gov/>>*U. S. Nuclear Regulatory Commission*(anglicky)
- [35] <<http://www.sujb.cz/>>*Státní úřad pro jadernou bezpečnost* (česky)
- [36] <<http://www.worldenergy.org/>>*World Energy Council*(anglicky)
- [37] <<http://www.westinghousenuclear.com/>>Westinghouse (anglicky)
- [34] <<http://www.wikipedia.org/>>*Wikipedia* (česky)
- [35] <<http://www.world-nuclear.org/>>*World Nuclear Association* (anglicky)

17.Seznam příloh

Příloha č.1:	Schéma jaderné elektrárny VVER 640.
Příloha č.2:	Chemické složení materiálů.
Příloha č.3:	Celková 3D koncepce jaderné elektrárny VVER 640.
Příloha č.4:	Havarijní dochlazovací systém jaderné elektrárny VVER 640.

Výkresová dokumentace:

SN2ESZ 01: Parní generátor VVER 640

SN2ESZ 02: Parní generátor VVER 640 - kusovník

SN2ESZ 03: Kolektor I. okruhu